



Catarina Maria **Estudo de Teste de**
dos Santos Pascoal **Resposta Térmica aplicado a**
 Geotermia

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Energia

Júri
Presidente (Doutor, João Garcia,
IPS_ESTSetúbal)
Orientador/Vogal (Doutor, Luís
Coelho, IPS-ESTSetúbal)
Vogal (Doutora, Anabela Carvalho,
IPS-ESTSCoimbra)

Dezembro 2015

*À minha querida mãe
e fiel amiga.*

Agradecimentos

A concretização do trabalho apresentado nesta dissertação não seria possível sem o contributo, direto ou indireto, de várias pessoas às quais gostaria de manifestar todo o meu apreço.

Primeiramente agradeço à minha família por toda a estabilidade emocional que me deram.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Luís Manuel Rodrigues Coelho, pela possibilidade de participar num projeto pioneiro em Portugal, pela competência na orientação da tese e pelos conhecimentos transmitidos, contribuindo para o enriquecimento pessoal e profissional. Acima de tudo, obrigada por acentuar o estímulo pelo conhecimento e desenvolvimento intelectual.

Agradeço à entidade *Sygene*, em particular ao Pedro Madureira, por permitir a minha contribuição e participação no projeto aqui apresentado.

Agradeço ao Luís Varela pela partilha de conhecimentos, e àqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento do projeto, e que levou à concretização desta tese.

Agradeço, por fim, a todos os docentes do Mestrado em Energia, por terem fornecido ferramentas necessárias para a realização desta tese.

Resumo

O desempenho térmico de um sistema de bomba de calor geotérmica é comumente estimado através da simulação numérica do permutador de calor, devendo ser confirmado após a execução do primeiro furo efetuado por um Teste de Resposta Térmica (TRT). Este, é um método de avaliar as características chave do comportamento térmico do terreno, e é utilizado com o intuito de dimensionar adequadamente um sistema de climatização geotérmica, tendo em conta dois parâmetros importantes que afetam diretamente o desempenho térmico: condutividade térmica do solo e resistência térmica. Durante o desenvolvimento do TRT foram efetuados testes de calibração ao equipamento. O estudo, utilizando o TRT, foi aplicado em duas instalações: bombas de calor geotérmicas na ESTSetúbal e instalação geotérmica na Quinta da Ombria – Algarve. Na instalação da ESTSetúbal, serviu também para realizar um estudo comparativo entre dois tipos de permutadores de calor, Duplo U e Coaxial simples. Após realização do teste, procedeu-se ao estudo de otimização da geometria dos furos geotérmicos verticais instalados na ESTSetúbal, utilizando um modelo de simulação de geotermia, a fim de verificar a adequabilidade da instalação já existente, tendo sido necessário também efetuar uma simulação energética dos espaços climatizados para obter os parâmetros das cargas térmicas. Tendo-se chegado à conclusão que os furos tinham sido devidamente dimensionados, apesar de na altura não ter sido efetuado qualquer teste TRT. O estudo aplicado à Quinta da Ombria, permitiu conhecer adequadamente as características térmicas do solo que servirá de base ao dimensionamento da instalação geotérmica.

Palavras-chave: Energia Geotérmica, Bomba de calor geotérmica, Teste de Resposta Térmica, Permutador de calor, Duplo U, Coaxial.

Abstract

The thermal performance of a geothermal heat pump system is commonly estimated by numerical simulation of the heat exchanger, and should be confirmed after the execution of the first borehole by a thermal response test (TRT). This is a method for evaluating the key characteristics of the terrain's thermal performance, and it is used in order to properly scale a geothermal space condition taking into account two important parameters that directly affect the thermal performance: thermal ground conductivity and thermal resistance. During the development of TRT, equipment calibration tests were performed. The study used the TRT at two geothermal installations: ground source heat pumps in ESTSetúbal and geothermal installation in Quinta da Ombria - Algarve. The installation in ESTSetúbal also served to conduct a comparative study between two types of heat exchangers, Double U and Coaxial simple. After completion of the thermal tests, it was initiated the study of the optimization of the geometry of vertical geothermal boreholes installed in ESTSetubal using a geothermal simulation model to verify the suitability of the existing installation, being also necessary to make an energy simulation for the air-conditioned spaces to obtain the parameters of thermal loads. It was concluded that the boreholes had been properly sized, although, at the time, it was not made any TRT test. The study applied to Quinta da Ombria created a good insight about the thermal characteristics of the soil on which the geothermal installation will be applied.

Keywords: Geothermal, Ground source heat pump, Thermal Response Test, Ground Heat Exchanger, U-pipe, Coaxial.

Índice

Agradecimentos	IV
Resumo	V
Abstract	VI
Lista de Figuras.....	X
Lista de Tabelas	XVI
Lista de Siglas e Acrónimos	XVII
Lista de Símbolos	XVIII
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Relevância do estudo	3
1.3. Enquadramento do Caso Prático.....	6
1.4. Motivação e âmbito da tese.....	7
1.5. Organização/Estrutura da tese	8
Capítulo 2.....	9
Revisão Bibliográfica.....	9
2.1. Simulação Energética de Edifícios.....	10
2.2. Simulação numérica de geotermia	11
2.3. Teoria da Fonte Linear	12
2.4. Geotermia	13
Capítulo 3.....	29
Simulação Numérica	29
3.1. Simulação Cargas Térmicas do Edifício	30
3.2. Simulação energética dos furos geotérmicos.....	43
Capítulo 4.....	50
Estudo de implementação do TRT – Caso Prático.....	50
4.1. Introdução.....	51
4.2. Metodologia experimental.....	54

4.2.1. Descrição do equipamento TRT	54
4.2.2. Calibração e teste do Equipamento TRT	55
4.2.3. Teste de Resposta Térmica	61
4.2.4. Teoria da Fonte Linear	64
4.3. Tratamento de dados	65
Capítulo 5 Resultados obtidos	68
5.1. Cargas Térmicas	69
5.2. Otimização dos furos geotérmicos	75
5.3. Teste de Resposta Térmica.....	79
5.3.1. Teste em Setúbal.....	79
5.3.2. Teste no Algarve.....	87
Capítulo 6.....	96
Conclusões.....	96
Capítulo 7.....	99
Desenvolvimento de Trabalhos Futuros.....	99
Referências.....	100
Anexos	1
Anexo I.....	2
Preparação do Artigo Científico	2
Anexo II.....	8
Relatório Técnico Geoplan (Sygene).....	8
Anexo III	9
Planta ESTSetúbal – Área abrangida pela Geotermia.....	9
.....	10
Anexo IV.....	11
Despacho 15793_E/2013: Valores do coeficiente de transmissão térmico por elementos em contacto com o solo.....	11
Anexo V.....	12
Cobertura Pesada Horizontal – ITE 50	12
Anexo VI.....	13
ITE 50: Coeficiente global de transmissão térmica, pavimento sobre espaços exteriores, sem isolamento térmico (fluxo ascendente) ...	13
Anexo VII.....	14

Resistências Superficiais - Despacho 159_K, Tabela 1.....	14
Anexo VIII.....	15
Despacho 15793_E – ponto 1.2.....	15
Anexo IX.....	16
ITE 50: Coeficiente global de transmissão térmica, Vãos envidraçados	16
Anexo X.....	17
Despacho 15793_K/2013: Fator solar do vidro.....	17
Anexo XI.....	18
Despacho 15793_K/2013: Fator solar envidraçado com proteção solar 100% ativa	18
Anexo XII.....	19
Mapa furos geotérmicos Quinta da Ombria, Algarve.....	19
.....	20

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Recurso energia geotérmica. [14].....	14
Figura 2.2 - Representação esquemática da perfuração vertical no subsolo - Permutador de Calor Duplo U. [16]	15
Figura 2.3 - Bomba de calor reversível. [17]	15
Figura 2.4 - Captação geotérmica (água-água) com permutador de calor vertical - com captação em lençol freático. [15]	16
Figura 2.5 -Captação geotérmica (Terra-água) com permutador de calor horizontal. [15].....	17
Figura 2.6 - Captação geotérmica (terra-água) com permutador de calor vertical. [15].....	17
Figura 2.7 - Tubagem de PEAD [20], tubagem de cobre revestido a PVC [21], respetivamente.	18
Figura 2.8 - Variação da temperatura em função da profundidade. [12].....	19
Figura 2.9 - Permutador de calor vertical. [4]	20
Figura 2.10 - Tipos de permutadores de calor em furos verticais, nomeadamente U e coaxial, respetivamente. [4]	21
Figura 2.11 - Permutador de calor geotérmico Vertical - Coaxial simples e complexo, respetivamente [19]	21
Figura 2.12 - Permutador de calor geotérmico vertical - U duplo e simples, respetivamente; e respetivo material de enchimento típico [19].....	21
Figura 2.13 - Princípio de funcionamento de uma Bomba de Calor. (ciclo de compressão) [15]	22
Figura 2.14 - Setup do TRT portátil, <i>in situ</i> . [6]	27
Figura 2.15 – Corte esquemático do furo com permutador de calor [19].....	28
Figura 3.1 – Localização da área em estudo, situada no piso térreo. [Google Earth].....	30

Figura 3.2 - Parâmetros climáticos da cidade de Setúbal.	31
Figura 3.3 – Identificação da área abrangida pela energia geotérmica.	32
Figura 3.4 - Constituição da envolvente exterior opaca (HAP).....	33
Figura 3.5 - Constituição da envolvente interior (HAP).	33
Figura 3.6 - Coeficiente de transmissão térmica do pavimento do solo (piso térreo), considerado por defeito, para todos os espaços em estudo. (HAP)	35
Figura 3.7 - Cobertura pesada horizontal da envolvente interior, considerado por defeito, para todos os espaços em estudo. (HAP).....	35
Figura 3.8 - Coeficiente de transmissão térmica; Fator médio solar (HAP).	36
Figura 3.9 - Fotografia do sombreamento vertical. [Foto: Catarina Pascoal]	37
Figura 3.10 - Parâmetros geotérmicos da pala sombreadora vertical, gabinete D117.....	37
Figura 3.11 - Fotografia do sombreamento horizontal. [Foto: Catarina Pascoal]	38
Figura 3.12 - Parâmetros geotérmicos da pala sombreadora horizontal, salas de aula D112 e D116. (HAP).....	38
Figura 3.13 - Perfil de ocupação típico de consumo energético nos gabinetes.	39
Figura 3.14 - Perfil de ocupação típico de consumo energético nas salas de aula. (HAP)	40
Figura 3.15 - Perfil de utilização de equipamentos nos gabinetes, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP).....	41
Figura 3.16 - Perfil de utilização de equipamentos nas salas de aula, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP).....	41
Figura 3.17 - Perfil de iluminação nos gabinetes, durante a semana e em perfil de dimensionamento. (HAP)	42

Figura 3.18 - Perfil de iluminação nas salas de aula, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP)	42
Figura 3.19 - Características do solo introduzidas no programa EED.	45
Figura 3.20 - Propriedades do furo geotérmico e permutador de calor	46
Figura 3.21 - Condutividade térmica do enchimento.....	46
Figura 3.22 – Propriedades furo geotérmico e permutador de calor: Tubagem em U.	46
Figura 3.23 - Parâmetros de resistência térmica do permutador de calor.	47
Figura 3.24 - Propriedades do fluido frigorigénico.	47
Figura 3.25 – Valores mensais de energia – Carga térmica (recolhidos simulação HAP).....	48
Figura 3.26 – Valores mensais de energia – Carga térmica.	49
Figura 4.1 - Local desenvolvimento experimental do TRT. [Google Earth]	51
Figura 4.2 - Bombas de calor geotérmicas.	52
Figura 4.3 - Energia de aquecimento produzida e respetivo COP. [19]	52
Figura 4.4 – Localização da Quinta da Ombria, Loulé. [Google Earth]	53
Figura 4.5 - Esquema da instalação do TRT.....	55
Figura 4.6 - Equipamento da aquisição de dados (GSM). [Foto: Catarina Pascoal].....	56
Figura 4.7 - Calibração sensores de temperatura. [Foto: Catarina Pascoal]	56
Figura 4.8 - Calibração das sondas de temperatura	58
Figuras 4.9 - Calibração do medidor de caudal. [Foto: Catarina Pascoal]	59
Figura 4.10 - Representação gráfica da calibração do caudalímetro	60

Figura 4.11 – Teste de Resposta Térmica Energesis, <i>in situ</i>	63
Figura 5.1 - Representação gráfica dos resultados das necessidades de aquecimento e arrefecimento mensais, conforme mostra a Tabela 5.4.	72
Figura 5.2 - Custos anuais, em percentagem de todo o espaço climatizado.	73
Figura 5.3 - Temperatura do fluido, ano 25.	75
Figura 5.4 - Temperatura anual mínima e máxima de fluido, no período de 25 anos.	76
Figura 5.5 - Otimização da instalação dos furos geotérmicos verticais.	77
Figura 5.6 - Representação da configuração instalada na ESTSetúbal (Geometria: 3 x 2).	79
Figura 5.7 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 1, 1º teste).	81
Figura 5.8 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 2, 1º teste).	82
Figura 5.9 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 2, 2º teste).	82
Figura 5.10 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 3, 1º teste).	83
Figura 5.11- Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Cx Simples n.º 1, 1º teste).	83

Figura 5.12 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 1, 1º teste).	84
Figura 5.13 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 2, 1º teste).	85
Figura 5.14 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 3, 1º teste).	85
Figura 5.15 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 2, 2º teste).	86
Figura 5.16 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 1, 1º teste).	86
Figura 5.17 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 1, teste nº 1).....	89
Figura 5.18 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 2, teste nº 2).....	90
Figura 5.19 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 3, teste nº 3).....	90
Figura 5.20 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT1, Teste nº 1).	91
Figura 5.21 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT2, Teste nº 2).	92
Figura 5.22 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT3, Teste nº 3).	92
Figura 5.23 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo (TRT1,Teste nº 1).	93
Figura 5.24 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo (TRT2,Teste nº 2).	94
Figura 5.25 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo	

(TRT3,Teste nº 3).	94
--------------------------	----

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dimensionamento dos espaços em estudo.....	32
Tabela 4.1 - Estudo de calibração dos dispositivos de termometria da instalação geotérmica.	57
Tabela 4.2 - Estudo de calibração do caudalímetro da instalação geotérmica.	59
Tabela 5.1 - Potência de aquecimento (Dimensionamento HAP)..	69
Tabela 5.2 - Potência de arrefecimento (Dimensionamento HAP).	69
Tabela 5.3 – Necessidades de energia útil – ganhos térmicos associados.	70
Tabela 5.4 - Resultados da simulação mensais da energia elétrica - espaço total climatizado.....	71
Tabela 5.5 – Consumo elétrico das bombas de calor para as necessidades energéticas.....	72
Tabela 5.6 - Custos anuais, espaço total climatizado.	73
Tabela 5.7 - Consumos energéticos anuais de arrefecimento e aquecimento.	74
Tabela 5.8 - Consumo energético de todos os componentes.	74
Tabela 5.9 - Comparação entre a instalação de furos geotérmicos verticais já existente; e a após simulação de TRT.	78
Tabela 5.10 - Comparação entre os principais resultados obtidos quer Duplo U, quer Coaxial (Setúbal).	80
Tabela 5.11 - Representação sucinta dos principais resultados obtidos aos TRT befetuados a três permutadores de calor Duplo U (Algarve).....	88

Lista de Siglas e Acrónimos

AQS	Águas Quentes Sanitárias
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
BHE	<i>Borehole Heat Exchangers</i> (Permutador de Calor)
COP	Coefficiente de desempenho das bombas de calor
EED	<i>Earth Energy Designer</i>
ESTSetúbal	Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
Ground-Hit	<i>Ground Coupled Heat Pumps of High Technology (Project)</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
GSHP	<i>Ground Source Heat Pump</i> (Bomba de calor Geotérmica)
HAP	<i>Hourly Analysis Program</i>
IEA	Agência Internacional de Energia
IGSHPA	Associação Internacional de Bomba de Calor Geotérmica
IPS	Instituto Politécnico de Setúbal
NZEB	<i>Net zero energy buldings</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila
SGV	Sondas Geotérmicas Verticais (Permutadores de Calor)
TRT	Teste de Resposta Térmica

Lista de Símbolos

Letras Gregas

α	Difusividade Térmica do solo [m^2/s]
γ	Constante de Euler
λ	Condutividade térmica [$\text{W}/(\text{m.K})$]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [$\text{kg}/(\text{m.s})$]
ρ	Massa específica [kg/m^3]

Letras Romanas

b_{tr}	Coefficiente de redução de perdas
c_p	Calor específico [$\text{J}/(\text{kg.K})$]
D	Diâmetro interior do tubo [m]
F	Medidor de caudal [l]
k	Inclinação da reta temperatura média vs logaritmo do tempo
\dot{m}	Caudal mássico [kg/s]
\dot{Q}	Potência térmica [W]
r_b	Raio do furo [m]
R_b	Resistência térmica [$(\text{m.K})/\text{W}$]
Re	Número de Reynolds
T_0	Temperatura do solo [$^{\circ}\text{C}$]
T_1	Temperatura de entrada no permutador de calor [$^{\circ}\text{C}$]
T_2	Temperatura de saída no permutador de calor [$^{\circ}\text{C}$]
T_3	Temperatura à entrada do permutador de calor localizado junto ao furo [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Temperatura média do fluido [$^{\circ}\text{C}$]
t	Tempo [s]
U	Coefficiente global de transmissão térmica [$\text{W}/(\text{m}^2.^{\circ}\text{C})$]
V	Velocidade média do fluido [m/s]

Capítulo 1

Introdução

No primeiro ponto deste capítulo é feita a descrição dos objetivos da tese; no segundo ponto é apresentado o enquadramento do caso prático no desenvolvimento científico e técnico; no terceiro ponto é explicada a relevância deste para a autora; no quarto ponto é apresentada a motivação no desenvolvimento do trabalho apresentado; e, por fim, no quinto e último ponto deste capítulo, é exposta a estrutura do presente documento. O quinto ponto deste capítulo tem ainda como missão descrever o modo como os temas abordados se articulam entre si e apresentar, de forma sucinta, os mesmos.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo acompanhar o projeto, desenvolvimento e teste do primeiro equipamento de Teste de Resposta Térmica (TRT) a ser equipado em Portugal, de forma a ser um sistema de teste portátil, de custo razoável, para que seja possível ser replicado o TRT *in situ*, por outros furos geotérmicos.

O principal objetivo é determinar um adequado procedimento de teste; incluindo acompanhar e documentar o processo de construção, calibração dos constituintes do TRT portátil, de custo razoável.

Como objetivo subjacente, o presente projeto passa por utilizar o modelo numérico da Teoria da Fonte Linear para obter os parâmetros térmicos dos furos em estudo nomeadamente condutividade térmica do solo e resistência térmica do furo, incorporando variáveis de potência, temperatura e caudal. O modelo serve então para determinar a resposta térmica dos furos em estudo, e respetivo solo, para determinadas propriedades térmicas utilizando os valores medidos pelo equipamento.

O modelo de cálculo utilizado para o estudo da resposta térmica dos furos foi desenvolvido através das folhas do *Excel*, com a implementação de um modelo numérico baseado na Teoria de fontes lineares (*linear source theory*). O modelo permite obter os valores da condutividade térmica do solo, da resistência térmica do furo, permitindo ainda calcular teoricamente a temperatura média do fluido que circula no furo, ao longo do tempo.

Relativamente à instalação da ESTSetúbal, o objetivo subjacente foca-se na verificação da conformidade e coerência entre os resultados obtidos através do modelo numérico efetuado na altura da implementação da instalação para o seu dimensionamento, sem recurso ao TRT e, portanto, com base em parâmetros estimados; comparando com a mesma modelação, mas utilizando os resultados obtidos pelo TRT (com base em medições e obtenção de parâmetros com base no modelo numérico). Relativamente aos parâmetros de condutividade térmica e resistência térmica, nos dois tipos de permutadores de calor verticais em estudo, Duplo U e Coaxial. O estudo permite também verificar qual dos dois tem melhor eficiência.

Para suportar esse estudo, foi necessário obter o perfil das cargas térmicas através da simulação energética da área climatizada pela energia geotérmica, utilizando *software*

Hourly Analysis Program (HAP). O último objetivo passa por otimizar a configuração da implementação dos furos geotérmicos verticais para os diferentes parâmetros, diretamente relacionadas com a localização geográfica e respectivas propriedades do solo. Esta simulação realizada aos furos geotérmicos verticais, é desenvolvida através do Software *Earth Energy Designer* (EED), que fornece para os parâmetros para uma determinada condutividade térmica e resistência térmica obtidas, um padrão de furos e respetiva geometria otimizados. Assim, uma vez ajustados os valores das propriedades do solo, realiza-se o estudo de otimização da geometria dos furos geotérmicos verticais, o que se traduz na condição mais eficiente para os dados experimentais obtidos para o estudo em questão. Este processo de ajustamento, quando realizado sistematicamente, permite obter a melhor solução quer em termos energéticos quer em termos económicos.

Uma vez que, no caso da ESTSetúbal, os furos geotérmicos já estavam instalados aquando a realização do presente trabalho, o último estudo realizado de simulação aos furos geotérmicos teve como intuito comparar a instalação e geometria realizadas antes e após a realização do TRT, permitindo verificar a coerência entre ambos os casos.

Relativamente à Quinta da Ombria, foram realizados os TRT aos primeiros furos efetuados, de forma a suportar adequadamente o dimensionamento de todo o sistema geotérmico.

1.2. Relevância do estudo

É impreterível que cada vez mais se recorra a regulamentação em diversos setores de atividade, por forma a criar garantias de equidade associadas a questões sociais e comportamentais, industriais como na produção e, em serviços. Estas questões estão associadas a toda a mobilidade de consumos energéticos, emissão de efluentes gasosos, entre outros parâmetros não menos importantes. Assim sendo, a regulamentação cumpre um papel muito importante em diversas áreas de atividade, contudo em domínios que dependem fortemente da economia mundial e onde o custo da tecnologia pode determinar a solução a implementar é necessário algo mais. A energia é um desses impérios, pelo que a sua utilização não é, de todo, consensual, nem tão pouco fácil de gerir.

Sabe-se que dois grandes domínios mundiais a nível desenvolvimento tecnológico são os Estados Unidos da América e União Europeia. Estes têm contribuído para a orientação e atenuação desta questão ainda com proporções desconhecidas. Sendo que

Portugal é um dos países pertencentes à União Europeia, têm vindo a ser tomadas medidas na área energética, que pretendem regular o modo como os países membros olham para a questão energética, uma vez que os edifícios da europa são grandes consumidores energéticos, representando cerca de 40% do consumo total de energia – de acordo com a Diretiva 10/31/EU [1]. Desta forma, tem-se vindo a desenvolver estudos, no qual a presente tese se enquadra, pelo que é importante desenvolver estudos sobre soluções de eficiência energética e utilização de fontes renováveis, para que seja possível implementá-las diretamente no setor.

Como é de senso comum, o caso do aumento da utilização de combustíveis fósseis tem induzido o aquecimento global, bem como a poluição atmosférica através dos gases efeitos de estufa, e a climatização utilizada nos edifícios representa uma grande parte do consumo de energia fóssil a nível mundial. Tem sido, desde os anos 70, uma preocupação conseguir gerir a dependência/necessidade energética consoante a disponibilidade da mesma, de origem fóssil existente no nosso planeta, a fim de procurar reduzir essa mesma dependência e consecutivamente minorar também os impactes associados a este consumo desenfreado e exploração no meio ambiente. No entanto, é necessário um longo período de tempo para que se notada a evolução das medidas de melhoria a implementar, e verificar resultados significativos a longo prazo.

Pelo que é necessário incentivar a utilização de energia de origem renovável, sendo tomada como uma das medidas a serem implementadas com objetivo de minimizar o consumo energético final e melhorar a eficiência dos equipamentos – compromissos assumidos pela União Europeia no âmbito da criação do Protocolo de Quioto. Já a Diretiva 2009/28/CE [2] promove a utilização de energia proveniente de fontes renováveis, impondo metas nacionais que garantam o cumprimento das quotas definidas para o consumo energético com recurso a energias renováveis na comunidade europeia até 2020.

Assim, considerada como uma medida tecnologicamente avançada, ecológica e sustentável, o aproveitamento de energia geotérmica, permitirá então melhorar as condições atuais de consumo e energia associadas a este problema, através do desenvolvimento de várias soluções eficientes energeticamente, nomeadamente a troca de calor com energia geotérmica trocada com o solo ou utilizando energia armazenada nos lençóis freáticos.

“A energia geotérmica é uma forma de energia renovável, disponível em todo o planeta e de forma constante em qualquer altura do ano. “[3]

Para o efeito, são necessárias bombas de calor geotérmicas (GSHP), que podem ser usadas para climatização e produção de águas quentes sanitárias (AQS), sendo que para cada fonte de energia deve ser utilizado um tipo de bomba de calor concebida para o efeito pretendido. [4]. Os sistemas de bombas de calor têm características desejáveis, incluindo a sua elevada eficiência, baixo custo de manutenção e baixo custo de ciclo de vida. [5]. Ainda em fase de projeto, é necessário ter em conta as propriedades térmicas do solo, nomeadamente condutividade térmica e resistência térmica do solo, influenciam diretamente o custo total duma instalação destas, dependendo da localização geográfica, tipo de permutador de calor, do custo de perfuração de determinada área e do número de furos geotérmicos a realizar. Deste modo, para que seja possível dimensionar e projetar uma instalação de furos geotérmicos é importante reduzir as incertezas relativas a determinados parâmetros do solo recorrendo ao desenvolvimento de um Teste de Resposta Térmica (TRT), para que seja possível estimá-las com o máximo de certeza. Uma vez conseguidas as cargas térmicas do edifício, é possível realizar um cálculo de otimização de geometria dos furos geotérmicos, entre outras variáveis, com o simples intuito de estudar a coerência entre a geometria e características do furo geotérmico, nomeadamente profundidade e diâmetro do furo, entre as simulações realizadas antes e depois do TRT.

O estudo e implementação do TRT, entre outras medidas a implementar no setor dos edifícios prevê ajudar a reduzir a emissão de gases de efeito de estufa e a cumprir o principal objetivo da Diretiva 2010/31/EU, através do recurso a energia renovável, de melhoria do desempenho energético dos edifícios. Isto, será conseguido pela imposição de limites ao consumo energético dos edifícios novos e de edifícios existentes aquando de uma grande reabilitação, que visa definir requisitos mínimos para os materiais e os sistemas mecânicos a utilizar nestes, pretendendo aumentar o número de edifícios com emissões quase nulas (NZEB); estabelecendo definitivamente o mercado de certificação energética dos edifícios. Ainda em fase de projeto, são incentivados os estudos de questões ambientais, técnicas e económicas de sistemas alternativos como as energias renováveis, bombas de calor e cogeração. Os grandes edifícios de serviço existentes, estão periodicamente obrigados a cumprir um limite máximo de consumo de energia, sendo

que estas soluções serão também atrativas para ser implementadas neste tipo de edifícios.
[1]

Assim, após descrição sucinta da relevância deste estudo, esta dissertação centra-se sobre os métodos de medição do solo e obtenção de respetivos parâmetros térmicos, realizando testes aos furos geotérmicos experimentais. De seguida, utilizando os resultados experimentais, recorre-se a modelos matemáticos para estimar com maior certeza as propriedades térmicas do solo em questão. Posteriormente, apresenta-se uma forma possível de otimização das características e geometria dos furos geotérmicos a instalar de forma a tornar-se mais económico e rentável a implementação dos mesmos.
[5]

1.3. Enquadramento do Caso Prático

O presente projeto surgiu no seguimento de um projeto anteriormente desenvolvido pelo Instituto Politécnico de Setúbal, que participou no projeto *Ground-Hit* através do desenvolvimento de uma bomba de calor geotérmica de alta eficiência para climatizar espaços do edifício. O trabalho centrou-se na melhor escolha de um fluido refrigerante e tipo de ciclo e na demonstração de funcionamento do protótipo. Nesse âmbito, foram instaladas duas bombas de calor geotérmicas com capacidade de aquecimento de 15 kW e 12 kW arrefecimento cada, com cinco furos geotérmicos a 80 m (três permutadores de calor duplo-U e dois coaxial simples). A energia térmica do sistema foi distribuída através de ventiloconvectores a dois tubos.

A instalação beneficia de um solo com boa condutividade térmica e existência de água subterrânea. Em termos de COP, a bomba de calor obteve 6,05 para uma potência de aquecimento de 12,11 kW e uma potência elétrica de 2 kW. O sistema usa R410A como fluido refrigerante, compressores de alta eficiência, evaporador duplo contracorrente e equicorrente e um condensador de alta capacidade. Com base no funcionamento, foi possível apurar que a configuração em duplo-U mostrou mais eficiência. [6]

Desta forma, dando seguimento ao projeto acima descrito, e usufruindo dos cinco furos geotérmicos existentes, deu-se início ao primeiro projeto e desenvolvimento de um TRT realizado em Portugal. Usufruindo dos parâmetros recolhidos através destes testes

realizados, simulou-se uma otimização quer das características quer da geometria dos furos verticais geotérmicos a fim de observar a situação que mais se adequa ao local em estudo, sendo que é importante que esta seja a situação mais económica e rentável para a localização na ESTSetúbal. Assim, após otimização, os resultados comparar-se-ão com as condições da instalação já existente.

O desenvolvimento do equipamento TRT foi feito em parceria com a empresa *Synege*.

1.4. Motivação e âmbito da tese

Tendo em conta que a autora detém grau de Licenciatura em Engenharia do Ambiente, é imprescindível e inevitável a fusão das questões Ambiente e Energia, uma vez que presentemente são dois assuntos de todo o interesse em que interajam. É do agrado de todos que os hábitos e dependências associadas ao consumo energético sejam minimizados através da redução e, possivelmente uma substituição, de recursos como o petróleo e o carvão, por recursos verdes/renováveis. Todas estas formas de educação da vida quotidiana quer a nível social, quer a nível industrial, contribuem diretamente para uma subsistência do meio ambiente mais sustentável, ainda que rentável.

Neste sentido, é aliciante poder acompanhar o desenvolvimento de um projeto pioneiro em Portugal de realização e teste de um Teste de Resposta Térmica (TRT) – equipamento fundamental na implementação de furos geotérmicos quer em projeto de edifícios, quer na reabilitação de edifícios já existentes; que permite recorrer à obtenção de energia renovável de forma ecológica, rentável e proporcionando igualmente conforto térmico como os métodos mais convencionais. Pelo que, o TRT desenvolvido serviu ainda para testar a viabilidade da implementação de um sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP), num projeto de *Hotel, Spa & Resort*, localizado na Quinta da Ombria – Algarve; uma mais-valia para o desenvolvimento deste projeto, enriquecendo o conhecimento da autora a nível profissional, pela aplicação de um caso prático no presente estudo.

No âmbito deste trabalho, o Anexo I apresenta a preparação de um artigo científico realizado com base no estudo efetuado ao TRT; e o Anexo II apresenta o primeiro relatório entregue, por parte da empresa *Synege* – parceira da ESTSetúbal no projeto de desenvolvimento do TRT, à empresa que requereu os serviços de testes geotérmicos

efetuados ao local, no Algarve.

1.5. Organização/Estrutura da tese

O capítulo 1 do presente documento é composto por 4 pontos, sendo que o primeiro ponto apresenta os objetivos da tese; o segundo ponto explica a relevância deste estudo; o terceiro apresenta a motivação do autor para realização da mesma; o quarto ponto realiza um pequeno enquadramento do trabalho realizado dando seguimento ao projeto de instalação de furos geotérmicos e aproveitamento do recurso geotérmico para climatização de espaços, anteriormente realizado; e, por fim o presente ponto que descreve como está estruturado o documento, de forma sucinta.

O capítulo 2 do presente documento serve para realizar uma breve revisão bibliográfica dos assuntos a serem abordados ao longo do estudo, para que seja possível a compreensão de qualquer leitor, aquando lhe for fornecido o acesso ao documento. Pelo que este ponto apresenta os seguintes temas:

1. Simulação energética de edifícios, cálculo do parâmetro de cargas térmicas;
2. Otimização geométrica e de características de furos geotérmicos verticais;
3. Teoria fonte linear – Comparar com resultados obtidos experimentalmente pelo TRT; criar estimativa que aumenta a certeza dos parâmetros;
4. Geotermia – Estudo de implementação, pelo recurso a este tipo de energia renovável, com recurso a sistemas GSHP;

O capítulo 3 apresenta e descreve o trabalho de simulação desenvolvida nos dos pontos 1 e 2 devidamente identificados acima. Aqui, faz-se uma descrição de todos os parâmetros considerados, apresentando a origem de cada um destes.

No capítulo 4, apresenta-se o trabalho de acompanhamento do projeto e desenvolvimento de um TRT, desde a calibração até aos tratamentos de dados obtidos através dos testes realizado, fazendo uma descrição de todos os parâmetros considerados.

Já o capítulo 5 detalha todos os resultados obtidos quer de simulação quer de testes de resposta térmica, e realizam-se pequenos comentários.

Por fim, no capítulo 6 são efetuadas as conclusões dos resultados obtidos no capítulo anterior; e o capítulo 7 apresenta propostas de desenvolvimento no futuro.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No presente capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica dos temas enunciados ao longo do documento. A revisão bibliográfica é, por definição, uma análise crítica, meticulosa e ampla das publicações correntes em uma determinada área do conhecimento.

Esta tem como intuito elucidar e/ou clarificar acerca dos temas abordados neste trabalho, nomeadamente responder previamente a possíveis questões que poderão suscitar dúvidas ao longo deste documento. Na revisão bibliográfica, por norma, recorre-se a artigos e antigos trabalhos como referência aos assuntos a tratar, a fim encaminhar o estudo e conhecer a forma como os assuntos foram abordados e analisados em estudos anteriores, e saber quais as variáveis encontradas dos em questão.

Neste capítulo procederei à apresentação e descrição sucinta dos temas a abordar ao longo deste documento, nomeadamente quanto à simulação energética pelo *Hourly Analysis Program* (HAP), simulação de furos geotérmicos pelo *Earth Energy Designer* (HAP), modelo numérico que permite a análise de dados obtidos através do Teste de Resposta Térmica, designado por Teoria da Fonte Linear; e por fim, abordo o tema Geotermia e sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP).

2.1. Simulação Energética de Edifícios

Atualmente existem vários *softwares* utilizados na simulação de edifícios. Em Portugal, os *softwares* mais utilizados são essencialmente quatro, nomeadamente o *Hourly Analysis Program* (HAP), o *Trace 700*, o *Design Builder* e o *Energy Plus*.

Como exemplo da aplicação do *Energy Plus*, aplicado a energia geotérmica, L.Coelho, J. Garcia, A. Almeida, N. Tavares, R. Cerdeira, K. Karytsas, D. Mendrinós, B. Sanner e E. Auzenet (2011), recorreram ao mesmo para realizar uma simulação energética de um edifício localizado em Coimbra, com o intuito de ajudar no dimensionamento e seleção dos componentes de climatização com base nas necessidades de aquecimento e arrefecimento. O estudo energético realizado através deste *software* permitiu saber que a necessidade de arrefecimento corresponde a 56,2 kW e a necessidade de aquecimento a 48,1 kW, pelo que foi possível identificar as bombas de calor adequadas ao panorama térmico em questão, nomeadamente de 81,8 kW para arrefecimento e 53,9 kW para aquecimento, respetivamente. Desta forma, foi possível realizar o estudo geotérmico necessário para as satisfazer, em função dos resultados obtidos aquando a simulação energética do edifício. [7]

Elisa Moretti, Emanuele Bonamente, Cinzia Buratti e Franco Cotana (2013), através do *software Energy Plus*, desenvolveram a simulação energética do edifício, estimando parâmetros – Exemplo: ocupação, para obter os perfis energéticos máximos horários, isto é, perfis de dimensionamento, a fim de estimar as necessidades máximas energéticas. Os resultados foram utilizados para projetar os novos sistemas de aquecimento e arrefecimento de acordo com a necessidade energética máxima, pelo que se obteve os requisitos de pico energéticos de 19kW para aquecimento e 12 kW para arrefecimento. As simulações foram necessárias para o correto dimensionamento do sistema geotérmico a instalar. [8]

RMJM, B, Emir, Civa, Latek, Proses, Citylight, Makpa, MEA UYY, Fiba (2013), enquanto equipa recorreram ao *software* HAP para realizar um estudo de simulação energética a um edifício universitário essencialmente com salas de aula e gabinetes. Este estudo foi realizado com o intuito de reduzir o consumo energético do edifício, e através de recurso a energia geotérmica, torná-lo mais sustentável por forma a regular automaticamente as necessidades de arrefecimento e/ou aquecimento, iluminação, e

realizando também uma leitura à qualidade do ar interior. Desta forma, os autores buscam a maximização da performance do edifício. [9]

2.2. Simulação numérica de geotermia

Erich Mands, Marc Sauer, Edgar Grundmann e Burkhard Sanner (2013) realizaram um estudo num edifício localizado em Limburg, Alemanha; pelo que a necessidade de recorrer a energia geotérmica surgiu com o propósito das bombas de calor geotérmicas na climatização do edifício, principalmente na refrigeração. Segundo os autores, a tarefa estabelecida para os cálculos do projeto seria cobrir a carga térmica base para o aquecimento do edifício e obter o máximo de arrefecimento possível vindo do solo. O ênfase está no arrefecimento, pois a refrigeração convencional é mais dispendiosa que o aquecimento convencional, neste caso com recurso a uma caldeira a gás. Como resultado, a operação seria dominada por dissipação de calor contínuo para o subsolo. Assim, uma vez que a temperatura do solo é praticamente constante ao longo do ano, a ideia seria, portanto, recorrer a energia geotérmica para utilizar como outra fonte fria fora do período de aquecimento principalmente na estação do verão. Deste modo, o *software* EED serviu para calcular o desenvolvimento da temperatura e, eventualmente, as necessidades energéticas anuais quer de aquecimento quer de arrefecimento, tanto em casos de necessidade térmica típica como em necessidades extremas. [10]

Bela Adam (2012) pretende comprovar por meio de medições e análises científicas os potenciais da geotermia realizando testes de resposta térmica em diferentes locais, com o intuito de garantir/mostrar as capacidades das bombas de calor geotérmicas e puder reforçar a razão para a existência da utilização do calor geotérmico doméstico. A autora julga ser, no futuro, uma inovação energética não só pela redução de consumo energético para cobrir necessidades energéticas domésticas, mas também a relação do mesmo com as vantagens ambientais, associado à eficiência das bombas de calor e uma consequente utilização de forma mais económica da energia. Para realizar este estudo, e comprovar as suas teorias, após realização dos testes de resposta térmica necessitou de recorrer ao *software* EED para otimizar o teste de resposta térmica, usando modelo matemático para analisar resultados obtidos através dos testes, e procurando otimizar os furos geotérmicos verticais em estudo, tendo em conta vários parâmetros, entre eles a relação custo-eficácia. [11]

L.Coelho, J. Garcia, A. Almeida, N. Tavares, R. Cerdeira, K. Karytsas, D. Mendrinós, B. Sanner e E. Auzenet (2011), após simulação energética de um edifício localizado em Coimbra, com o intuito de ajudar no dimensionamento e seleção dos componentes de climatização com base nas necessidades de aquecimento e arrefecimento, recorrem ao *software* EED. O EED permite obter a melhor configuração a instalar dos furos geotérmicos e respetiva profundidade dos furos verticais de forma a cobrir as necessidades energéticas anteriormente obtidas aquando a realização da simulação energética, tendo em conta parâmetros nomeadamente a relação custo-eficiência do sistema a instalar. Desta forma, foi-lhes possível realizar o estudo geotérmico necessário para as satisfazer, em função dos resultados obtidos aquando a simulação energética do edifício. [7]

2.3. Teoria da Fonte Linear

Têm vindo a ser utilizadas várias abordagens para estimar as propriedades térmicas do solo. Uma das abordagens é recorrer ao modelo numérico da Teoria da fonte linear (*Line Source Model*).

Bela Adam (2012) recorre à teoria da fonte linear para avaliar a resposta térmica dos testes efetuados aos furos geotérmicos. A autora, com o recurso ao TRT, pretende comprovar por meio de medições e análises científicas os potenciais da geotermia realizando testes de resposta térmica em diferentes locais. Pelo que, com recurso à teoria da fonte linear, a autora explica que obteve o valor da condutividade térmica (λ) a partir da tangente da temperatura média logarítmica do fluido de entrada e saída, pela resolução da equação diferencial da transmissão de calor, com base em valores/parâmetros calculados durante o ensaio de resposta térmica obtém-se o valor da inclinação da tangente pode ser determinada. [11]

Signhild Gehlin (2002), no seguimento de um projeto de desenvolvimento de um protótipo de um TRT portátil, o autor sente necessidade de avaliar os diferentes modelos matemáticos existentes para comparar resultados obtidos entre eles. Neste contexto, o autor recorre à teoria da fonte linear. A sua finalidade é determinar uma forma mais eficaz e viável de caracterizar a capacidade de transferência de calor envolvida no processo geotérmico. Desta forma, a fim de otimizar este processo de armazenamento de energia

térmica, o objetivo principal do autor, passa por desenvolver um método de medição e avaliação com base nos existentes, para que o modelo matemático desenvolvido pelo autor pudesse desde então, a ser utilizado preferencialmente aquando a conceção e estudo destes sistemas. [4]

Hemmingway, Phil; Long Michael (Michael M.) recorreram à teoria da fonte linear no âmbito de testes de resposta térmica realizados em Nortfolk, no Reino Unido – local de construção de um novo centro de saúde. Pelo que, os autores decidiram realizar vários testes aos mesmos furos a fim de comparar os parâmetros obtidos. Para obter os resultados dos testes efetuados, necessitaram de recorrer ao presente modelo matemático para obter parâmetros relevantes, nomeadamente a condutividade térmica. [12]

2.4. Geotermia

De uma forma sucinta, e em linguagem comum, a geotermia é a energia da terra ou um conjunto de ciências e técnicas de estudo e exploração do calor existente no interior do planeta. Explorada pelo homem como fonte renovável, essa energia, que provém quer da absorção da radiação solar pelo solo, quer como resultado da atividade telúrica, do núcleo e do manto – Figura 2.1, é retirada do interior do solo e usada como energia térmica ou energia elétrica. [4] [13]

Atualmente, a energia geotérmica pode ser utilizada para produção de energia elétrica, aquecimento de residências, piscinas ou águas quentes sanitárias (AQS), e ainda para inúmeros projetos espalhados pelo mundo com aproveitamento deste tipo de energia com outros fins:

- Agricultura: a água fóssil geotérmica é utilizada para aquecimento dos solos e de estufas (por exemplo: no Novo México);
- Aquacultura: o calor geotérmico é utilizado para aquecimento de viveiros de peixes de águas quentes e de camarões (Exemplo: na Califórnia);
- Indústrias: para além de aquecer as unidades industriais, a água fóssil geotérmica é também utilizada para produção de energia para processos de secagem, na produção de alimentos e fabrico de madeiras (por exemplo: no Nevada). [13]

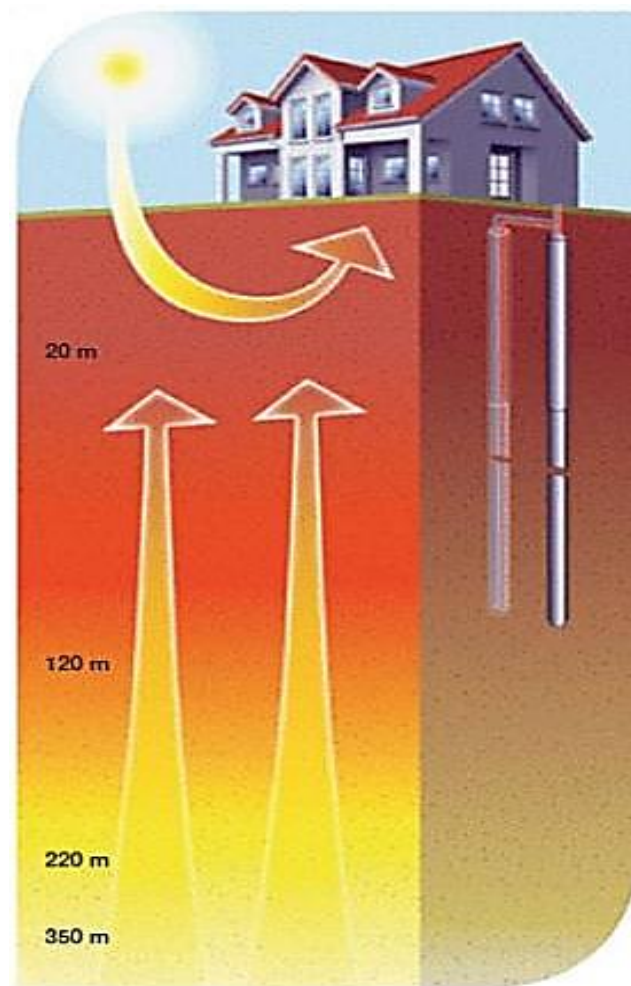


Figura 2.1 - Recurso energia geotérmica. [14]

No entanto, para o efeito de climatização e/ou produção de calor, são instaladas bombas de calor geotérmicas, que podem ser usadas para climatização e produção de águas quentes sanitárias (AQS). Note-se que para cada fonte de energia deve ser utilizado um tipo de bomba de calor concebida para o efeito pretendido. [4]

O princípio de funcionamento do sistema resume-se à execução de uma fonte de calor geotérmica, através da perfuração do subsolo e inclusão nesses furos das sondas geotérmicas em profundidade – Figura 2.2. [15]. As sondas geotérmicas (permutadores de calor) são portadoras de um fluido constituído por água (normalmente glicolada) que, ao longo do trajeto de ida e retorno (cerca de 200m), recolhe um diferencial térmico até um permutador que o cede ao circuito frigorígeno da bomba de calor, a qual, cumprindo o chamado "Ciclo de Carnot", aumenta a temperatura do gás refrigerante até um valor

que pode chegar a cerca de 60 °C, valor este de permuta na zona de condensação para o circuito de difusão da instalação interior.

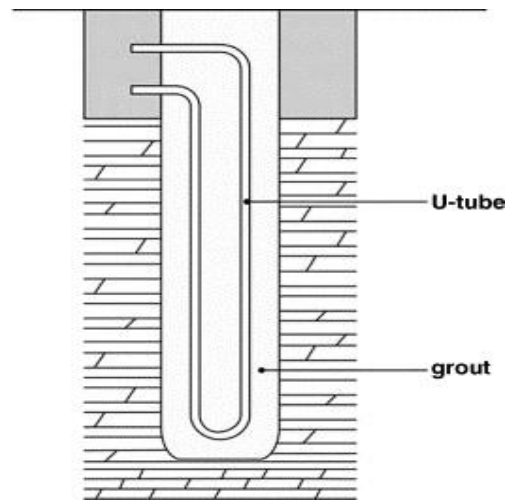


Figura 2.2 - Representação esquemática da perfuração vertical no subsolo - Permutador de Calor Duplo U. [16]

No modo de arrefecimento, o ciclo é invertido e o calor da casa é transferido para as sondas geotérmicas. [15] Este processo pode ocorrer através da funcionalidade de reversibilidade da bomba de calor – Figura 2.3.

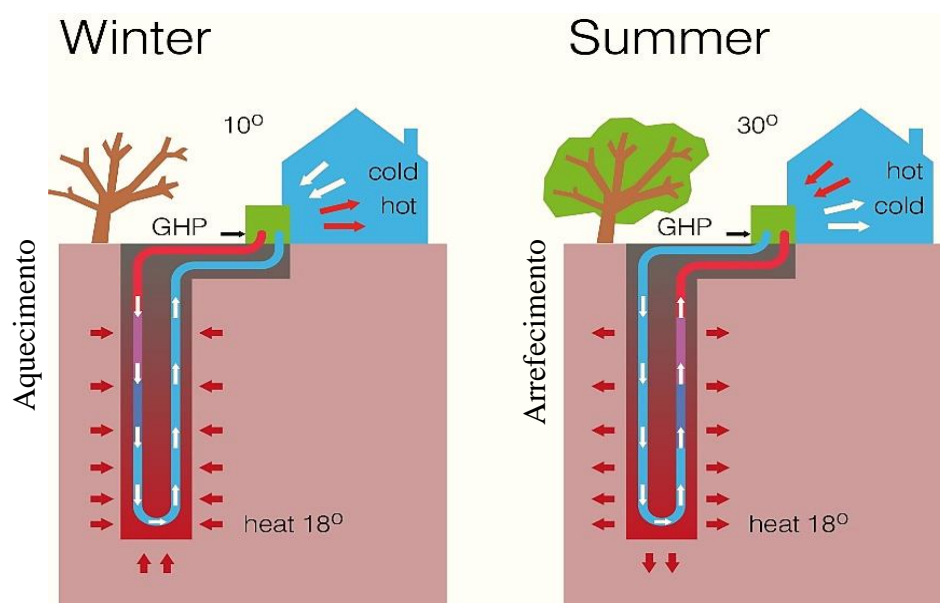


Figura 2.3 - Bomba de calor reversível. [17]

A energia geotérmica separa-se em energia de muito baixa entalpia de alta entalpia consoante o fluido utilizado esteja a menos de 15°C ou a mais de 140°C, respetivamente. Em Portugal, existe apenas energia geotérmica de baixa entalpia – abaixo dos 80°C, contudo é possível usufruir deste recurso natural em aplicações diretas como referido anteriormente, nomeadamente usufruto direto da energia geotérmica em climatização de edifícios e no aquecimento de piscinas e estufas. [18] As diferentes entalpias de energia geotérmica podem ser aproveitadas de diferentes formas, nomeadamente:

- Alta entalpia ($T > 140\text{ }^{\circ}\text{C}$) – Produção de energia elétrica;
- Média entalpia ($80\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 140\text{ }^{\circ}\text{C}$) – Produção de energia elétrica;
- Baixa entalpia ($60\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) – Utilização de energia térmica direta;
- Muito baixa entalpia ($15\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) – Utilização energia térmica direta e/ou energia térmica indireta (GSHP). [19]

Por cada quilómetro de profundidade, a temperatura do solo aumenta cerca de 33°C, sendo que, devido à variação da composição da crosta terrestre, estes valores oscilam. Qualquer temperatura existente no solo pode ser utilizada diretamente como energia geotérmica, com o recurso de bombas de calor geotérmicas. Normalmente, existe no solo um fluido que permite efetuar esta troca de calor - designado por lençóis freáticos ou infiltrações das chuvas, contudo no caso de não existir, existe a possibilidade de injetar água no solo – rochas quentes – Figura 2.4. Existem ainda aflorações naturais de água quente, normalmente em zonas vulcânicas, utilizadas e conhecidas há séculos para fins termiais. [6] [18]

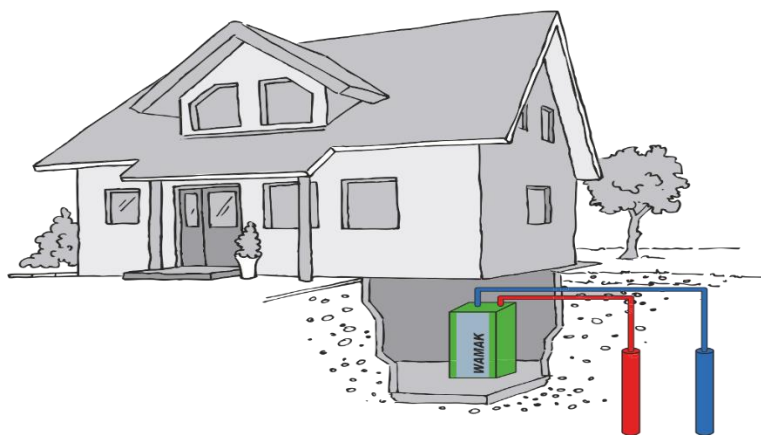


Figura 2.4 - Captação geotérmica (água-água) com permutador de calor vertical - com captação em lençol freático. [15]

A principal vantagem do uso do solo como fonte ou dreno do sistema é que este ambiente beneficia de uma temperatura do solo relativamente constante significativo quando comparado com o ar ambiente. Isto resulta numa melhoria geral do desempenho térmico do sistema quando comparado com bombas de calor ar-ar e, portanto, reduz os custos operacionais. A bomba de calor utilizada em edifícios residenciais e comerciais, é geralmente uma unidade de água-ar, onde a água (ou a mistura de água-anticongelante) troca de calor com o solo. Em configurações comuns, o permutador de calor geotérmico consiste em diferentes geometrias de tubos instalados numa configuração horizontal ou vertical – Figuras 2.5 e 2.6, respetivamente. [15]

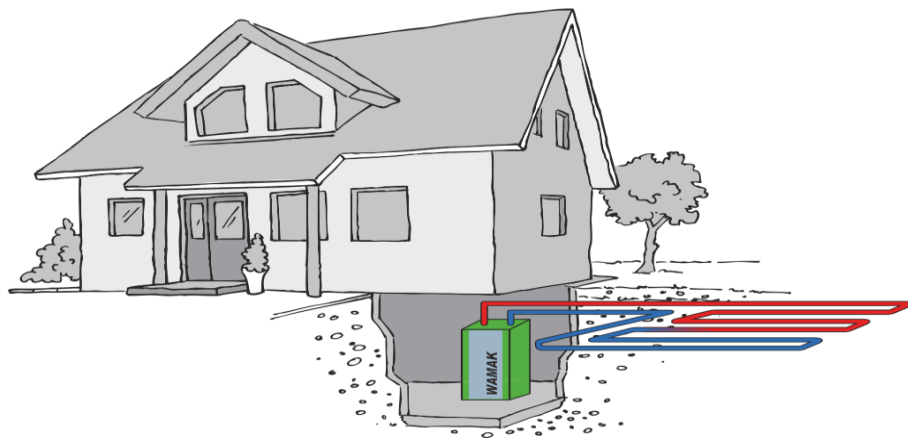


Figura 2.5 -Captação geotérmica (Terra-água) com permutador de calor horizontal. [15]

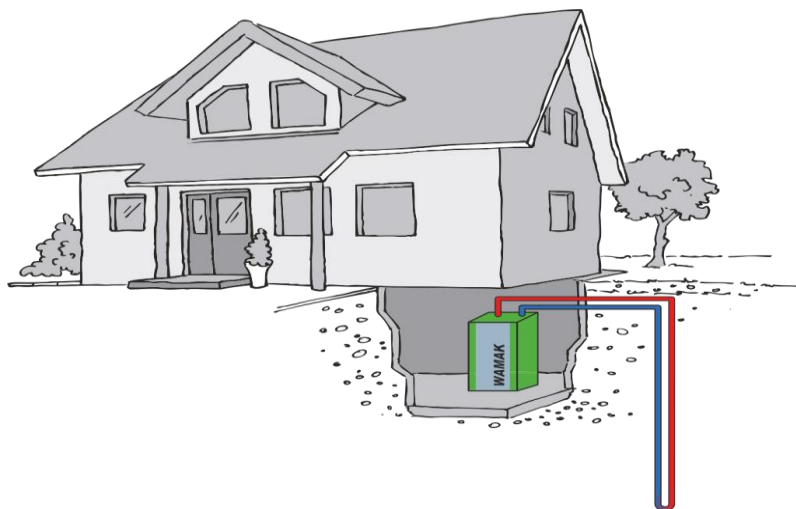


Figura 2.6 - Captação geotérmica (terra-água) com permutador de calor vertical. [15]

As configurações horizontais são muitas vezes mais económicas, mas exigem uma vasta área de terreno, normalmente 1,5 a 2 vezes a superfície habitável a aquecer, e é normalmente limitada a uso comercial. Nestes casos, a energia geotérmica pode ser captada através de calor residual localizado no solo ou através de lenções freáticos. Deste modo, sempre que haja área de terreno suficiente, pode-se captar as calorias do solo, através de captadores horizontais constituídos por uma tubagem de polietileno – Figura 2.7, ou cobre revestido de PVC, colocada em valas de simples ou dupla profundidade ou simplesmente coberta com terra, dentro da qual circula, em circuito fechado, um fluxo de água glicolada, que transporta o calor da terra para o grupo geotérmico. [15]

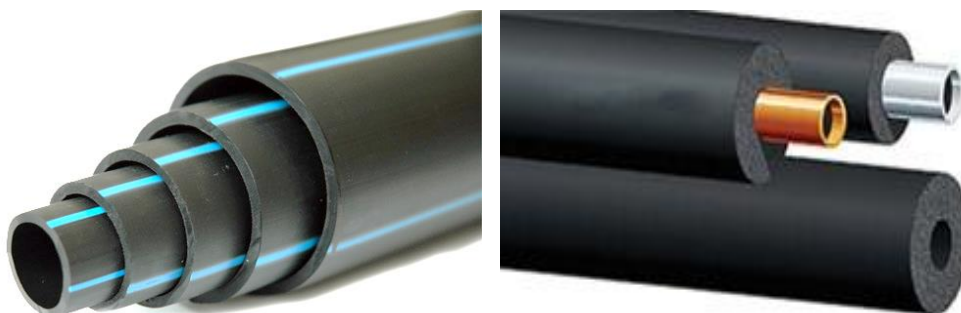


Figura 2.7 - Tubagem de PEAD [20], tubagem de cobre revestido a PVC [21],
respetivamente.

Por outro lado, na captação freática, no caso de já existir um furo com água disponível em quantidade suficiente pode optar-se por instalar permutadores de calor uma vez que as características da água não interferem com a energia geotérmica; ou quando se decide optar por uma solução freática conseguem-se coeficientes de performance, muito elevados no aquecimento e arrefecimento quase gratuito, pela possibilidade de utilização do processo de arrefecimento passivo que torna a instalação altamente rentável. A água do furo de captação passará por um permutador de material resistente à sua agressividade. A jusante do furo de extração deverá ser feito um outro de restituição, a uma distância de 10 a 15 metros, para receber a água restituída pelo grupo geotérmico. [22] Contudo, atualmente a maioria das unidades residenciais e comerciais usam um

permutador de calor vertical uma vez que, normalmente, oferece melhor desempenho que a horizontal, devido à menor oscilação sazonal da temperatura média do solo – Figura 2.8.

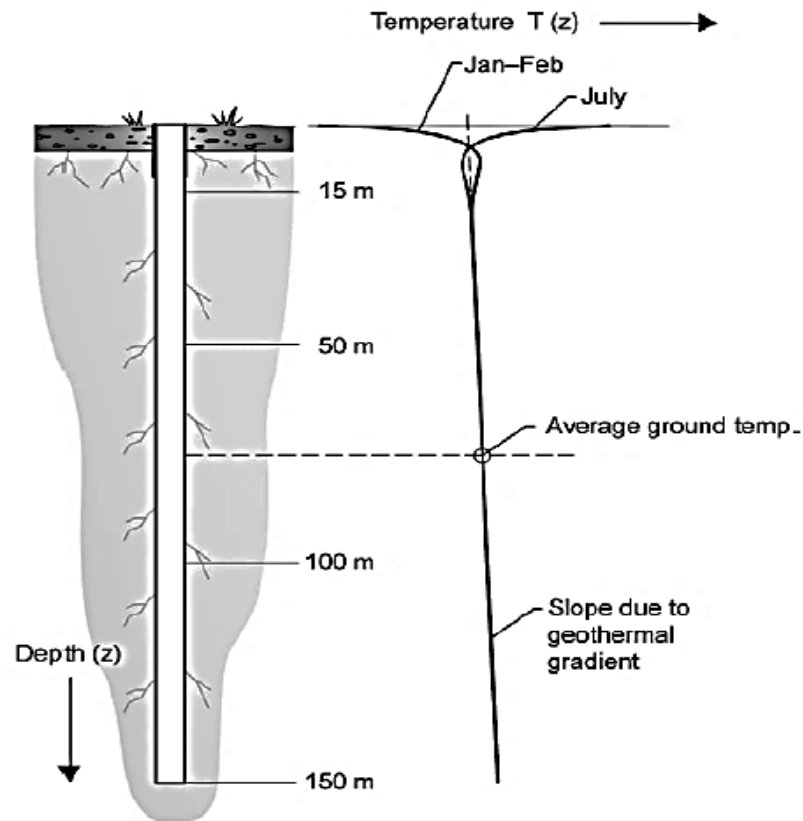


Figura 2.8 - Variação da temperatura em função da profundidade. [12]

Dependendo do tamanho das unidades de bomba de calor e as propriedades do solo, mais do que um furo geotérmico pode ser necessário e devem ser consideradas as opções de configuração geotérmica desses furos, para que a instalação seja económica e eficiente. [16] Um furo geotérmico é um sistema no qual a sondagem de um furo é utilizado para permitir trocas de calor entre um fluido circulante no interior do furo e o solo, o qual atua como um dissipador de energia ou como fonte conforme referido anteriormente.

O fenómeno transporte-calor opera principalmente através da condução de calor quando o movimento da água subterrânea é inexistente. A resposta térmica de um sistema de furo geotérmico instalado é apresentada por uma alteração de temperatura no interior e no solo circundante como uma função de extração ou injeção de calor – Figuras 2.3 e 2.9.

[5] O parâmetro considerado mais importante é a condutividade térmica do solo, uma vez que este parâmetro é específico do local e não pode ser influenciado pela engenharia. No entanto, o contacto térmico entre o furo no solo e o fluido no interior dos tubos é controlado pelo raio do tubo, tamanho, configuração, material da tubulação, entre outros. Estes parâmetros podem ser alterados ou ajustados no sentido de influenciar a resistência térmica do furo. A maior ou menor capacidade de absorção do solo encontra-se diretamente relacionada com as suas propriedades (condutividade térmica, composição, calor específico e difusidade térmica) e de propriedades relacionadas com a composição do material da tubagem e enchimento utilizado nos furos e o tipo de furo. [2] [3]

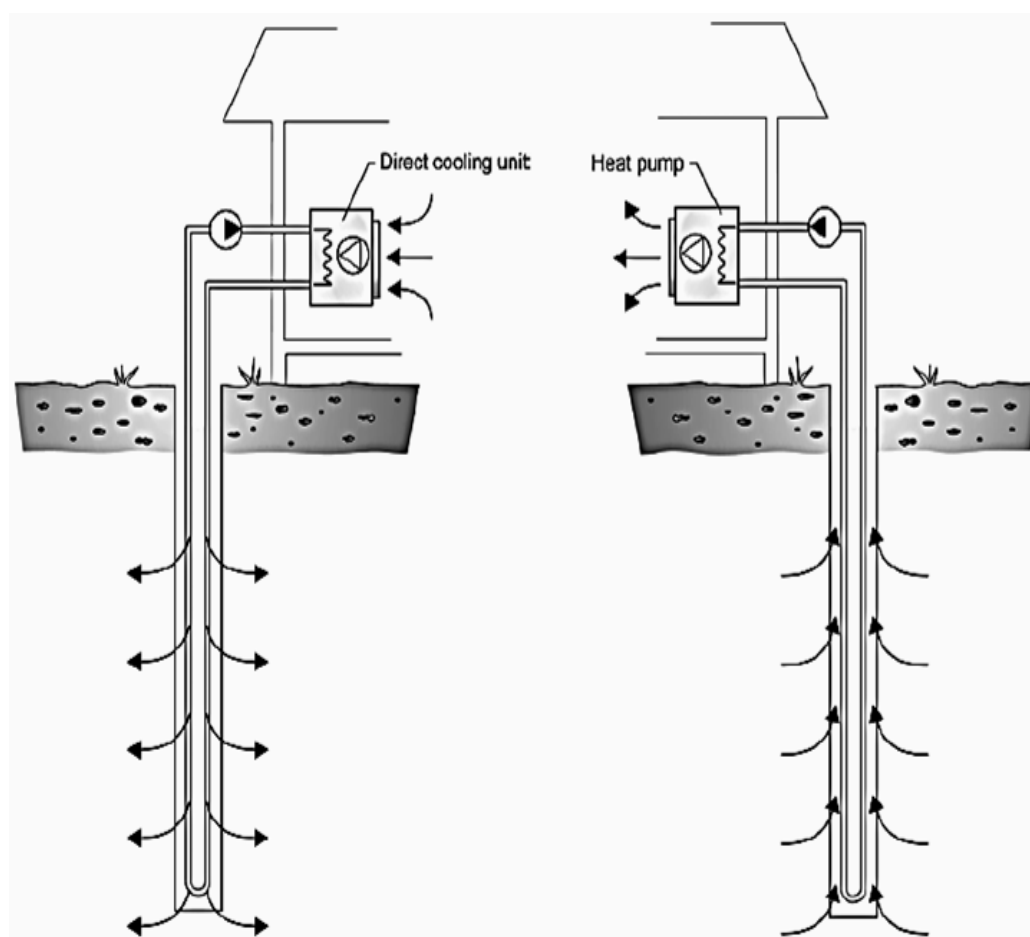


Figura 2.9 - Permutador de calor vertical. [4]

Os furos verticais representam 80% das aplicações geotérmicas na Europa e neles podem ser usados tubos concêntricos (coaxiais) ou em U – Figuras 2.10, 2.11 e 2.12.

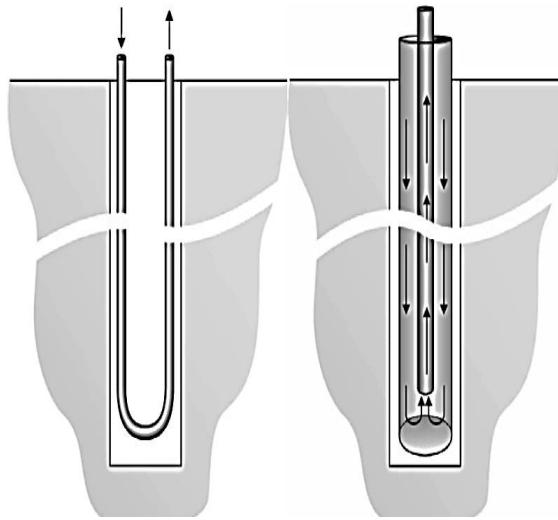


Figura 2.10 - Tipos de permutadores de calor em furos verticais, nomeadamente U e coaxial, respetivamente. [4]

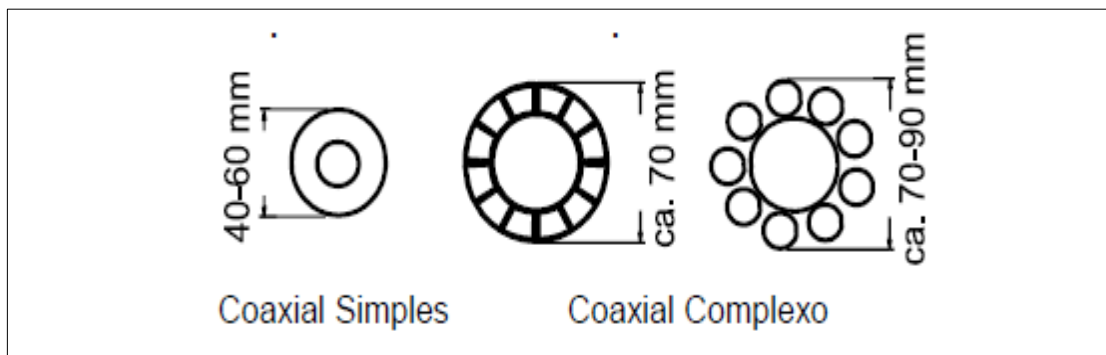


Figura 2.11 - Permutador de calor geotérmico Vertical - Coaxial simples e complexo, respetivamente [19]

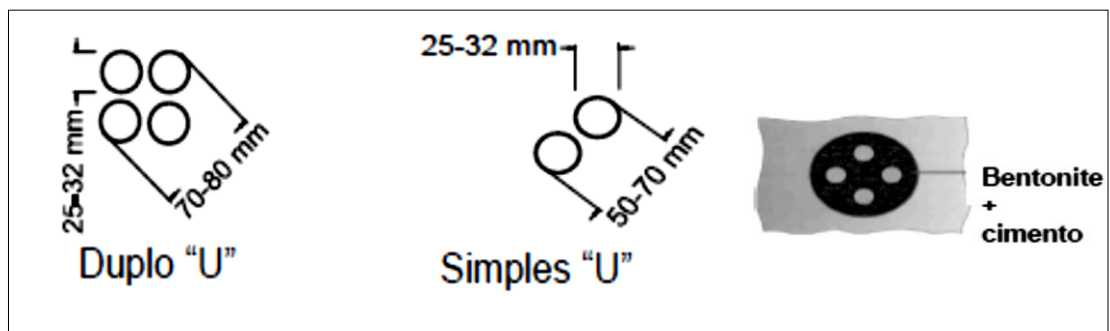


Figura 2.12 - Permutador de calor geotérmico vertical - U duplo e simples, respetivamente; e respetivo material de enchimento típico [19]

As sondas geotérmicas verticais (SGV) são permutadores de calor, em tubo de polietileno (Figura 2.7) – polietileno de alta densidade (PEAD), com diâmetro entre os 32mm e os 40mm, sendo que a vida útil deste material é de cerca de 50 anos; colocados em furos a uma profundidade da ordem dos 100 metros.

Nos últimos anos, as bombas de calor geotérmicas (GSHP) têm vindo a ser reconhecidas como sistemas limpos, eficientes e económicos para aquecimento e arrefecimento dos edifícios residenciais e comerciais. Os sistemas GSHP, que consistem numa bomba de calor convencional emparelhada a um permutador de calor para solos, têm características desejáveis, incluindo a sua elevada eficiência, baixo custo de manutenção e baixo custo de ciclo de vida. O investimento necessário para a instalação de sistemas GSHP, em particular para a perfuração, de um sistema destes é ainda o principal obstáculo ao mercado. Porém, estudos rigorosos na fase de projeto, testes de resposta térmica (TRT) no início da instalação e a monitorização e controlo durante a operação podem minimizar esta questão. [6] Este sistema utiliza como fontes ar, água subterrânea ou superficial, energia solar ou solo – Figura 2.13. O caso do sistema GSHP, é uma tipologia bastante interessante pelo facto de ser possível utilizar água-água ligadas a anéis fechados de circulação de água no solo.

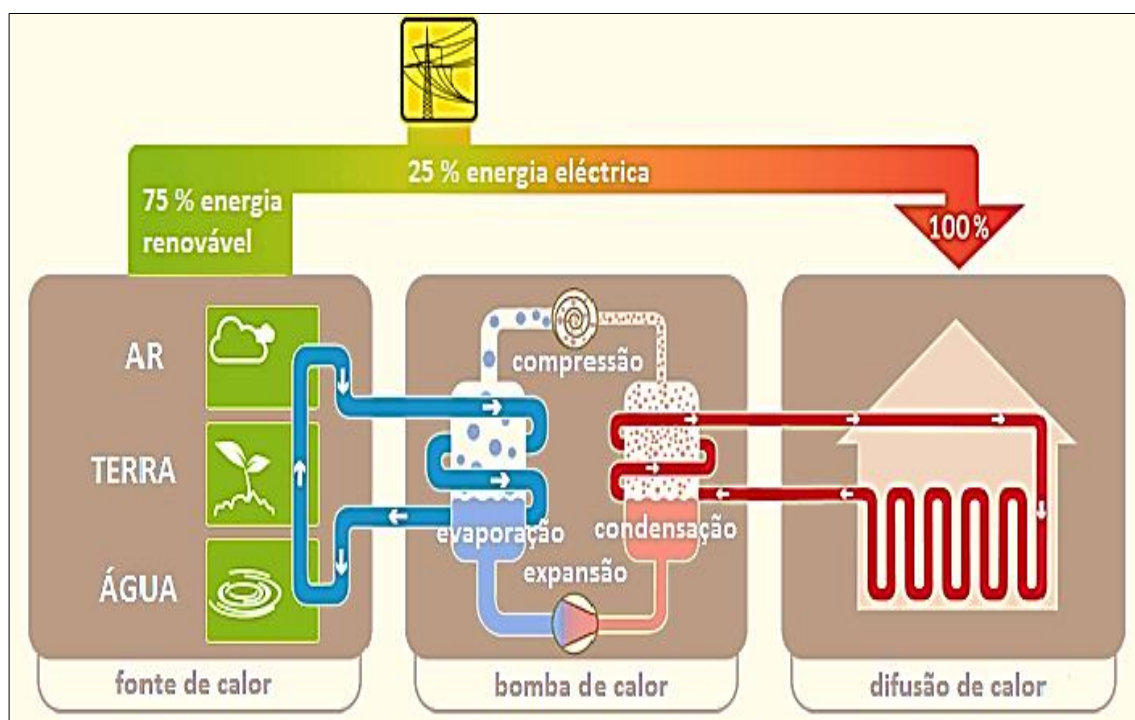


Figura 2.13 - Princípio de funcionamento de uma Bomba de Calor. (ciclo de compressão) [15]

Por outras palavras, pode definir-se uma bomba de calor como sendo um equipamento que transfere calor de uma fonte fria para um reservatório a temperatura superior, podendo ainda ser utilizada para transferir energia da fonte quente para a fonte fria, com melhor desempenho neste caso – bomba de calor reversível, conforme mostra a Figura 2.9 mostrada anteriormente. O tipo de bomba de calor mais comum usa o ciclo de compressão de vapor. [2] É de salientar que a eficiência da bomba de calor depende diretamente da temperatura da fonte de calor e do ambiente.

Este sistema é constituído por três componentes principais, nomeadamente: furos geotérmicos (BHE), que têm tipicamente diâmetros entre 90 mm e 150 mm, e entre 30 m a 200 m de profundidade; a bomba de calor (GSHP) tipicamente água-água e o sistema de distribuição de energia térmica. Estes são compostos por um circuito primário (inclui circuito aberto e fechado) e um secundário. No primeiro, está incluída a captação geotérmica (furos): os permutadores de calor enterrados, as bombas de circulação, tubagens, coletores e outros equipamentos auxiliares. Pelo que o circuito aberto refere-se a furos para extração e injeção de água de minas ou túneis (10 – 15 m); e o circuito fechado refere-se a permutadores de calor enterrados, circuitos verticais (60 – 250 m) ou circuitos horizontais (1,2 - 1,5 m), onde há troca de calor em águas de lagos, rios, mares (fontes não geotérmicas). [19]. Quanto ao circuito secundário, este corresponde à distribuição de água para o edifício e é semelhante aos restantes sistemas de bombas de calor ou caldeiras. Há ainda a bomba de calor em si, responsável pela produção de frio ou calor. A diferença entre esta e outras tecnologias está no circuito primário, que pode ser aberto ou fechado. Nos circuitos abertos, são feitos furos para extração e injeção de água e utilizadas águas de minas ou túneis. [6]

“«Bomba de calor», uma máquina, um dispositivo ou uma instalação que transferem calor dos elementos naturais circundantes, como o ar, a água ou o sono, para os edifícios ou processos industriais invertendo o fluxo de calor natural para que este passe de uma temperatura mais baixa para uma temperatura mais alta. No caso de bombas de calor reversíveis, a transferência de calor pode fazer-se também do edifício para os elementos naturais circundantes”. [2]

De forma sucinta, de acordo com o que foi observado na revisão bibliográfica, as bombas de calor geotérmicas (GSHP) tornam-se vantajosas:

- São uma tecnologia fiável e provada, mas ainda com forte potencial de desenvolvimento;
- Novos fluidos; novos equipamentos; associadas a outras renováveis (ex. solar), etc;
- Reduz os custos de aquecimento e arrefecimento entre 25% a 75%;
- Reduz significativamente as emissões de CO₂;
- Aumenta o valor do ciclo de vida do edifício;
- Promove o conforto nos edifícios (menor ruído, menor impacto visual);
- Protege o ambiente;
- Promove o desenvolvimento sustentável da utilização energética. [19]

Este sistema a, como referido acima, tem a possibilidade de integração com outros sistemas - aquecimento/arrefecimento, preparação de AQS, aquecimento de piscinas; integração com energia solar térmica e fotovoltaica; integração com sistemas de armazenamento de energia (aquecimento/arrefecimento) incluindo armazenamento no subsolo; integração com outros sistemas de climatização.

Como referido anteriormente, a única desvantagem associada a esta instalação está no custo de instalação mais elevado em relação a outras fontes renováveis – furos geotérmicos: 35 - 40 €/metro.

Valores típicos de um sistema GSHP:

- Custo da instalação
 - GSHP ligado em circuito aberto com furos de água – 600 – 1000 €/kW_{th};
 - GSHP ligado em circuito fechado a furos de calor geotérmicos (BHE): 1000 – 1500 €/kW_{th}.
- Custo de funcionamento (eletricidade e manutenção):
 - 0,015 – 0,028 €/kW_{th}.

- Custo Total de aquecimento/arrefecimento (5% de depreciação / 20 anos de vida):
 - GSHP: 0,038 -0,048 €/kWh_{th};
 - Gasóleo: 0,065 €/kWh_{th};
 - Gás Natural: 0,058 €/kWh_{th};
 - Arrefecimento de bombas de calor a água: 0,06 €/kWh_{th}. [19]

Em termos de eficiência, estes sistemas são bastante vantajosos uma vez que esta está associada à temperatura da água: cerca de 15 °C – 19 °C (depende da região – exemplo: Setúbal, 18 °C) pelo que esta região é estável na maior parte do ano. Isto permite:

- Eficiência no aquecimento ambiente;
- Eficiência no arrefecimento ambiente;
- Eficiência na preparação de AQS.

Assim, em termos teóricos, a eficiência de uma bomba de calor depende das temperaturas entre as quais é trocada energia sob a forma de calor.

- Ciclo de refrigeração reversível:

$$EER = COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \Leftrightarrow EER = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

- Ciclo de bomba de calor reversível:

$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \Leftrightarrow COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

Nota: Temperaturas em Kelvin. [19]

Pelo que esta tecnologia GSHP é cada vez mais um método de produção de energia de uma forma eficiente quer a nível energético quer a nível ecológico/ambiental, devido ao seu potencial para reduzir significativamente as emissões atmosféricas. Uma pesquisa recente no campo GSHP tem contribuído para a redução do custo do ciclo de vida e

ampliando a aplicabilidade desta tecnologia. Uma área de pesquisa importante é a modelação, o que permite simulações do sistema a ser executado, a fim de realizar uma boa previsão. Para sistemas GSHP, a simulação é uma ferramenta importante para fins de projeto do sistema, bem como para investigar o desempenho do sistema a longo prazo. As diversas abordagens utilizadas para a modelagem do permutador de calor podem ser divididas em duas categorias principais. Alguns modelos de simulação, principalmente a curto espaço de tempo (menos de uma hora), são utilizados como ferramentas de projeto. Outros modelos são utilizados para projetar permutadores de calor, sendo realizadas simplificações para torna-los computacionalmente eficientes para a realização do estudo de desempenho do sistema GSHP a longo prazo (no presente caso prático, até 25 anos), como é o caso do programa *Earth Energy Designer* (EED), utilizado no presente documento. Para grandes valores de tempo, são relevantes parâmetros como a interferência térmica entre furos no caso da instalação de vários furos geotérmicos, pelo que programas como o EED permitem calcular funções numericamente, designadas por g-funções, sendo que os valores são dados para várias configurações. [16]

No entanto, poderão existir desvios locais das propriedades do solo, relativamente às propriedades típicas da região. Neste âmbito, o desempenho térmico de um sistema de bomba de calor geotérmica - *geothermal heat pump* ou *ground source heat pump* (GSHP), para que se obtenha uma solução eficaz, necessita de complementar as previsões numéricas com realização de testes locais, pelo que é comumente designado de *monitorização in situ* ou modelagem numérica do permutador de calor – *Borehole heat exchangers* (BHE), designada por Teste de Resposta Térmica (TRT), realizados como auxiliar ao projeto de instalações geotérmicas. O método *Line Source Theory* é o mais simples e rápido, sendo o mais utilizado na Europa. [6]

Estes TRT elaborados *in situ* – Figura 2.14, com recurso a equipamento portátil, têm como principal interesse a determinação da composição do solo, a avaliação do desempenho dos diferentes tipos de permutadores existentes e as características reais do solo, tais como a condutividade e a convecção existente em furos permeáveis ou na proximidade de lençóis freáticos. [4]

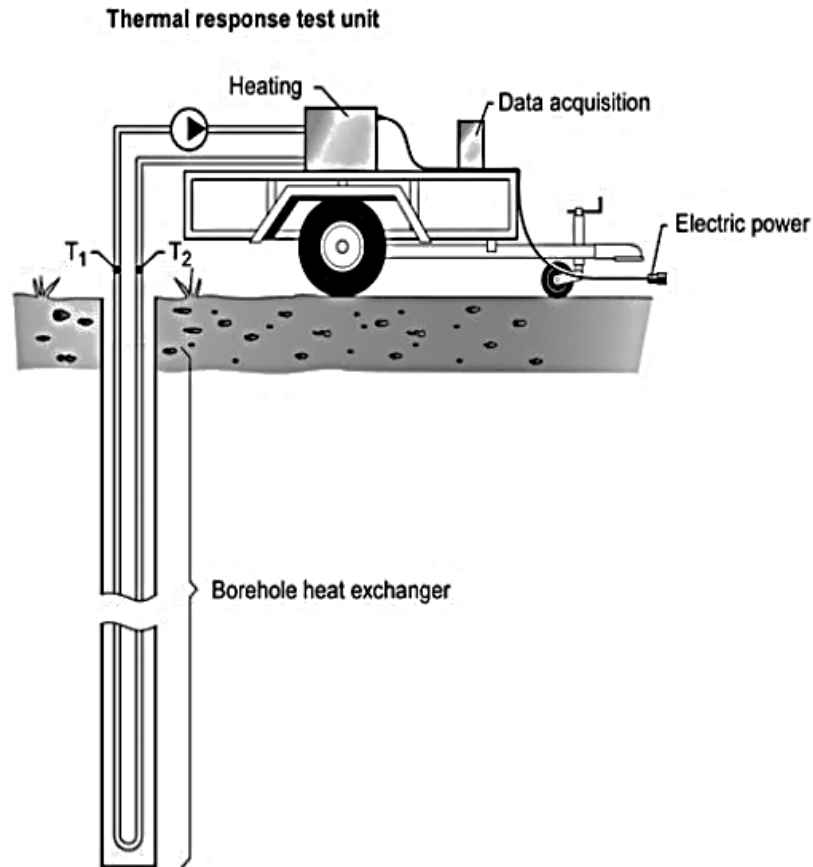


Figura 2.14 - Setup do TRT portátil, *in situ*. [6]

Por outras palavras, o TRT é um método de avaliar o potencial de um determinado local, tendo em conta as características chave do comportamento térmico do terreno e, por consequente, uma forma de obter uma estimativa dos rendimentos de transferência térmica, de forma a poder dimensionar com segurança um sistema de climatização geotérmico, tendo em conta as principais características a determinar, nomeadamente a condutividade térmica, a resistência térmica no interior do furo e as condições térmicas do terreno – Exemplo: A resistência térmica do furo depende do tipo de material de enchimento (*Grout material*), do tipo de material da tubagem, do diâmetro do furo, das características do escoamento do fluido - Figura 2.15. [19]

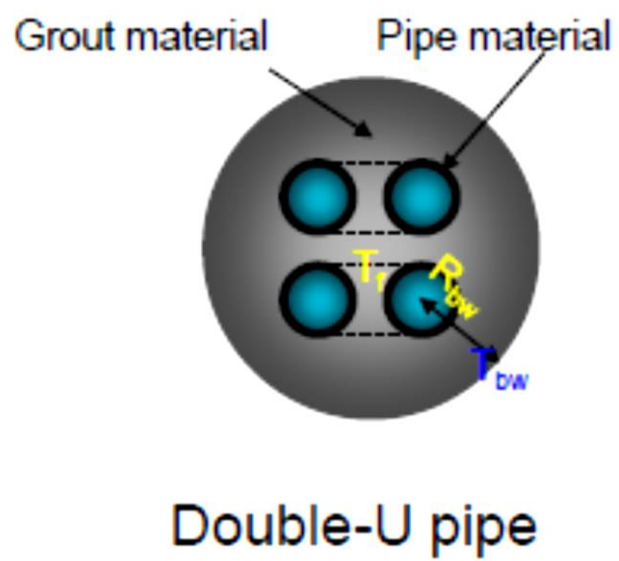


Figura 2.15 – Corte esquemático do furo com permutador de calor [19]

Capítulo 3

Simulação Numérica

Neste capítulo, apresenta-se o trabalho de simulação desenvolvido para esta tese, fazendo uma descrição de todos os parâmetros considerados. Aqui, o intuito é apresentar e explicar os parâmetros a que se recorreu em cada um dos *softwares* e os resultados obtidos – ver 5.1 e 5.2, respetivamente. Com a realização destas simulações, não está subentendida a replicação do caso em estudo, na ESTSetúbal, apenas a sua compreensão e acompanhamento do desenvolvimento.

3.1. Simulação Cargas Térmicas do Edifício

O trabalho aqui apresentado de simulação energética foi realizado á área abrangida pelo recurso a energia geotérmica, através dos furos geotérmicos instalados na ESTSetúbal – Figura 3.1, nomeadamente sete escritórios e duas salas de aula – Figura 3.3; ver planta no Anexo III, tendo em conta variados parâmetros aqui apresentados e devidamente descritos.



Figura 3.1 – Localização da área em estudo, situada no piso térreo. [Google Earth]

No presente estudo, o *software* utilizado para a realização da simulação energética foi o HAP. Este usufrui de duas poderosas ferramentas num único pacote, nomeadamente características versáteis para a conceção de sistemas de AVAC para prédios comerciais e recursos de análise de energia poderosas para comparar o consumo de energia e os custos operacionais de alternativas de projeto. Ao combinar as duas ferramentas num único pacote, é possível economizar tempo despendido na execução de projetos. Os dados de entrada e resultados de cálculos de conceção do sistema podem ser usados diretamente em estudos de energia. Este foi projetado para engenheiros de consultoria, conceção/construção empreiteiros, prestadores de serviços de climatização,

engenheiros de instalações e outros profissionais envolvidos no projeto e análise de sistemas de AVAC de edifícios de serviço. Este, também tem a capacidade de analisar a energia durante cerca de 8760 horas, característica muito útil para o desenvolvimento de projetos de edifícios sustentáveis. O recurso ao *software* HAP serve para realizar uma simulação energética à área em estudo, o dimensionamento das instalações de climatização e verificação de consumos e custos energéticos do edifício, pelo que o presente estudo tem por objetivo obter os resultados relativos às cargas térmicas mensais.

A cidade de Setúbal encontra-se a uma latitude de 38,5 graus do Norte para Oeste, longitude 8,8 graus, a uma elevação de 10 metros. A Figura 3.2 apresenta as condições exteriores de projeto da cidade de Setúbal obtidas através da publicação “Temperaturas Exteriores de Projeto e Números de Graus-Dias” – Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (1989). [23] Os dados climáticos foram obtidos através do programa Climas-SCE do LNEG.

Weather Properties - [Setubal]	
Design Parameters Design Temperatures Design Solar Simulation	
Region: Europe	Atmospheric Cleanness Number: 1.00
Location: Portugal	Average Ground Reflectance: 0.20
City: Setubal	Soil Conductivity: 1.385 W/m/K
Latitude: 38.5 deg	Design Clg Calculation Months: Jan to Dec
Longitude: 8.8 deg	Time Zone (GMT +/-): 0.0 hours
Elevation: 10.0 m	Daylight Savings Time: Yes
Summer Design DB: 32.1 °C	DST Begins: Mar 25
Summer Coincident WB: 21.3 °C	DST Ends: Oct 25
Summer Daily Range: 12.2 K	Data Source:
Winter Design DB: 3.1 °C	User Modified
Winter Coincident WB: 2.0 °C	
OK Cancel Help	

Figura 3.2 - Parâmetros climáticos da cidade de Setúbal.

Na Figura 3.3 encontram-se identificados os espaços em estudo, abrangidos pela área com recurso à energia geotérmica, localizada no piso térreo, usufruindo de uma área total aproximada de 750 m². Para melhor observação da planta ver Anexo III. Estes espaços dispõem de um sistema de climatização composto por uma bomba de calor com 12 kW em arrefecimento e 15 kW em aquecimento.

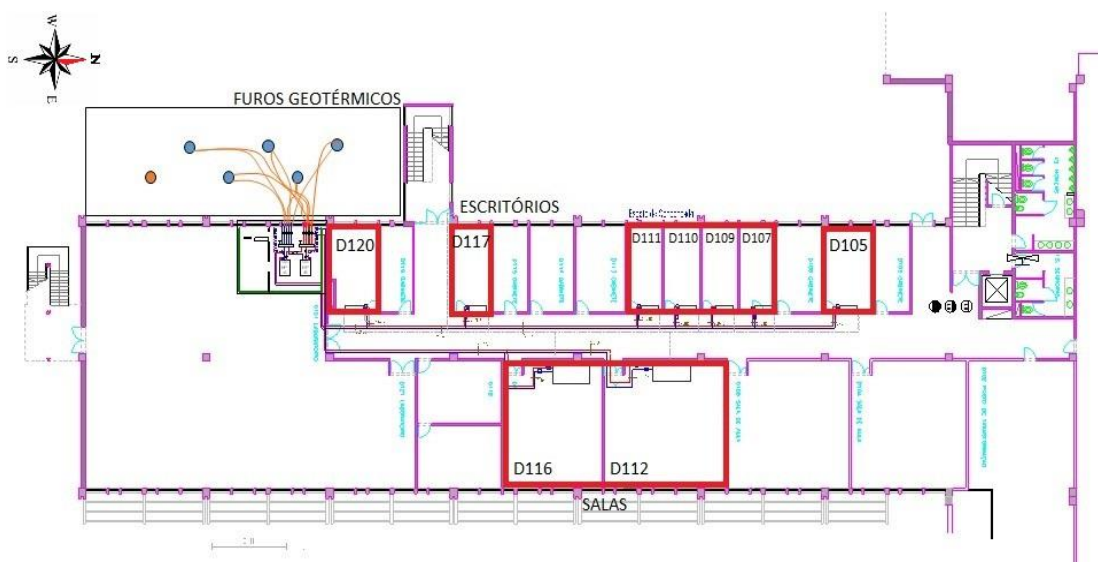


Figura 3.3 – Identificação da área abrangida pela energia geotérmica.

Posteriormente, conforme devidamente apresentado/identificado na planta acima, no quadro seguinte estão apresentadas as áreas úteis, abrangentes pela área em estudo, dividida pelos seguintes espaços:

Tabela 3.1 – Dimensionamento dos espaços em estudo.

Espaços		Orientação	Área pavimento (m ²)	Pé direito (m)	Área envidraçados (m ²)	Área envolvente interior (m ²)	Área envolvente opaca exterior (m ²)
Gabinetes	D105	NW	18,13	3,35	4,13	47,0	7,33
	D107	NW	12,61	3,35	3,20	43,4	4,77
	D109	NW	12,61	3,35	3,20	43,4	4,77
	D110	NW	12,61	3,35	3,20	43,4	4,77
	D111	NW	12,61	3,35	3,20	43,4	4,77
	D117	NW	13,89	3,35	3,20	44,3	5,58
	D120	NW	18,13	3,35	4,13	47,0	7,33
Salas aula	D112	SW	58,67	3,35	9,43	85,7	18,80
	D116	SW	72,30	3,35	8,32	80,38	14,60
			231,56				

A envolvente exterior opaca do edifício é constituída, do exterior para o interior por 20mm de reboco tradicional; 110 mm de tijolo furado 11; 40 mm de caixa-de-ar; 110 mm de tijolo furado 11; 20 mm de reboco tradicional, conforme mostra a Figura 3.4. O coeficiente global de transferência de calor (U) é de 1,086 W/ (m².°C).

Layers: Inside to Outside	Thickness mm	Density kg/m³	Specific Ht. kJ/kg.K	R-Value m².K/W	Weight kg/m²
Inside surface resistance	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Reboco tradicional	20,000	1900,0	1,00	0,01500	38,0
Tijolo furado 11	110,000	695,0	1,00	0,27000	76,5
Air space	40,000	0,0	1,00	0,18000	0,0
Tijolo furado 11	110,000	695,0	1,00	0,27000	76,5
Reboco tradicional	20,000	1900,0	1,00	0,01539	38,0
Outside surface resistance	0,000	0,0	0,00	0,04000	0,0
Totals	300,000			0,92	228,9

Overall U-Value: 1,086W/m².K

Figura 3.4 - Constituição da envolvente exterior opaca (HAP).

Quanto à envolvente interior, esta está disposta por 20 mm de camada de reboco tradicional; 110 mm de tijolo furado 11 e 20 mm de reboco tradicional – Figura 3.5. O coeficiente global de transmissão de calor (U) é de 1,784 W/(m².°C).

Layers: Inside to Outside	Thickness mm	Density kg/m³	Specific Ht. kJ/kg.K	R-Value m².K/W	Weight kg/m²
Inside surface resistance	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Reboco tradicional	20,000	1900,0	1,00	0,01500	38,0
Tijolo furado 11	110,000	695,0	1,00	0,27000	76,5
Reboco tradicional	20,000	1900,0	1,00	0,01539	38,0
Outside surface resistance	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Totals	150,000			0,56	152,5

Overall U-Value: 1,784W/m².K

Figura 3.5 - Constituição da envolvente interior (HAP).

Ainda relativamente às características da envolvente dos espaços em estudo, uma vez que não se conhece as características do pavimento (piso térreo) nem da cobertura (pavimento do 1º piso), por defeito considerar-se-á, para todos os espaços em estudo:

- $U_{\text{pavimento_Solo}} = 1,0 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, pela Tabela 2 do Despacho 15793_E/2013 – ver Figura 3.6, Anexo IV; [24]
- Cobertura aligeirada com blocos cerâmicos da envolvente interior:

$$U_{\text{Ina}} = \frac{1}{\frac{1}{2,6} + 0,06} = 2,25 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$$
, onde:

- Fórmula: Transformação do coeficiente de transmissão térmica de pavimento sobre ar exterior para pavimentos de separação entre um espaço útil interior (aquecido) e um local não aquecido (Ina), pelo Figura II.10, do ITE 50 - Figura 3.7, Anexo V; [25]
- $2,6 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, valor U envolvente exterior (sentido ascendente), pelo Quadro II.10 do ITE 50 - ver Anexo VI; [26]
- $0,06 \text{ (m}^2\cdot^{\circ}\text{C)/W}$, corresponde à diferença entre duas resistências superficiais com fluxo de calor no sentido ascendente, pela Tabela 1 do Despacho 15793_K/2013; Anexo VII: [27]
 - ✓ $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot^{\circ}\text{C)/W}$ referente à envolvente exterior;
 - ✓ $R_{\text{si}} = 0,10 \text{ (m}^2\cdot^{\circ}\text{C)/W}$ referente à envolvente interior.
- $b_{\text{tr}} = 0,8$, valor considerado por defeito para todos os espaços não úteis, de acordo com o ponto 1.2 do Despacho 15793_E/2013 – Anexo VIII; [24]
- Temperatura interior Verão = $0,8 * (32,1-25) + 25 = 30,68 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Temperatura interior Inverno = $0,8 * (3,1-20) + 20 = 6,48 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sendo que as temperaturas extremas para os dois piores casos possíveis ao longo do ano foram calculadas para introduzir no HAP – Figura 3.7.

Já o b_{tr} , que por designação traduz-se no coeficiente de redução de perdas, ou redução de transmissão de calor. Pelo Despacho 15793_K/2013, o cálculo das perdas de calor por transmissão em elementos que separam o espaço com condições de referência de espaços com temperatura ambiente diferente do ar exterior, como o caso dos elementos da envolvente interior, este será afetado pelo coeficiente de redução de perdas, b_{tr} . [27]

Space Properties - [GabineteD105]

General | Internals | Walls, Windows, Doors | Roofs, Skylights | Infiltration | **Floors** | Partitions

Floor Type

- ☐ Floor Above Conditioned Space
- ☐ Floor Above Unconditioned Space
- ☒ Slab Floor On Grade
- ☐ Slab Floor Below Grade

Slab Floor On Grade

Floor Area: 18,1 m²

Total Floor U-value: 1,000 W/m²/K

Exposed Perimeter: 3,4 m

Edge Insulation B-value: 0,00 m²-K/W

OK Cancel Help

Figura 3.6 - Coeficiente de transmissão térmica do pavimento do solo (piso térreo), considerado por defeito, para todos os espaços em estudo. (HAP)

Space Properties - [GabineteD105]

General | Internals | Walls, Windows, Doors | Roofs, Skylights | Infiltration | **Partitions** | Floors

	Partition 1	Partition 2
	<input type="radio"/> Ceiling Partition <input checked="" type="radio"/> <u>W</u> all Partition	<input checked="" type="radio"/> Ceiling Partition <input type="radio"/> <u>W</u> all Partition
Area	47,0	18,1 m²
<u>U</u> -Value	1,784	2,250 W/m²/K
Unconditioned Space Max Temp.	32,1	32,1 °C
Ambient at Space Max Temp.	30,7	30,7 °C
Unconditioned Space Min Temp.	6,5	6,5 °C
Ambient at Space Min Temp.	3,1	3,1 °C

OK Cancel Help

Figura 3.7 - Cobertura pesada horizontal da envolvente interior, considerado por defeito, para todos os espaços em estudo. (HAP)

Relativamente aos envidraçados, as características destes são homogêneas, nomeadamente vidro simples; incolor; espessura de 5mm; caixilharia metálica; tipo de janela de correr; proteção solar interior 100% ativa, semitransparente, de cor clara. Através desta informação detalhada acerca dos envidraçados dos espaços em estudo, foi possível obter os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de transmissão térmica do envidraçado ($U_{\text{envidraçado}}$) é 6,5 W/(m².°C) – pelo Anexo III, ITE 50. Ver Figura 3.8, Anexo IX; [25]
- Fator solar do vidro considerado para este tipo de envidraçados é de 0,87 – pela Tabela 12 do Despacho 15973-K/2013 - ver Anexo X; [27]
- Fator solar do envidraçado com proteção solar 100% ativa, semitransparente e de cor clara: 0,36 – pela Tabela 13, Despacho 15973-K/2013; Ver Anexo XI; [27]

Considerou-se um valor médio anual da influência da proteção solar, sendo também necessário efetuar uma correção a este valor por parte do HAP:

- Fator solar médio anual: $60\% \times 0,36 + 40\% \times 0,87 = 0,56$;
- Correção HAP = $0,56 / 0,87 = 0,65$ – Figura 3.8.

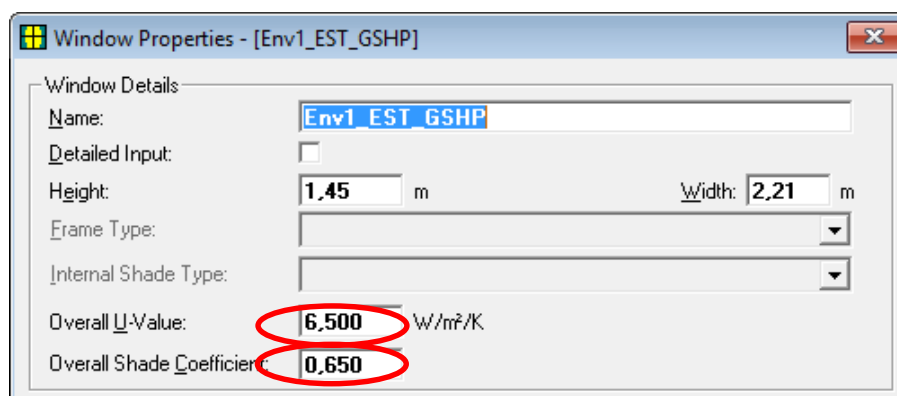


Figura 3.8 - Coeficiente de transmissão térmica; Fator médio solar (HAP).

Contudo, existem três espaços que são diretamente influenciados por palas sombreadoras, nomeadamente um gabinete e duas salas de aula. O Gabinete D117 é influenciado por uma zona de escadas do edifício localizado à sua esquerda, que se comporta como uma pala sombreadora vertical – Figuras 3.9 e 3.10.



Figura 3.9 - Fotografia do sombreamento vertical. [Foto: Catarina Pascoal]

A screenshot of a software dialog box titled "Shading Geometry Properties - [PalaGab_EST_GSHP_D117]". The dialog box contains several input fields for defining the geometry of a vertical shading fin. The "Name" field is set to "PalaGab_EST_GSHP_D117". The "Reveal Depth" is set to "150,0" mm. The "Overhang" section has four fields: "Projection from surface" (0,0 mm), "Height above window" (0,0 mm), "Ext. past RH side of window" (0,0 mm), and "Ext. past LH side of window" (0,0 mm). The "Left Fin" section has three fields: "Projection from surface" (5000,0 mm, which is circled in red), "Height above window" (2000,0 mm), and "Dist. from edge of window" (0,0 mm). The "Right Fin" section has three fields: "Projection from surface" (350,0 mm), "Height above window" (2000,0 mm), and "Dist. from edge of window" (0,0 mm). At the bottom are "OK", "Cancel", and "Help" buttons.

Figura 3.10 - Parâmetros geotérmicos da pala sombreadora vertical, gabinete D117.

Já as salas de aula D112 e D116 são diretamente influenciadas por uma pala sombreadora horizontal com uma profundidade aproximada de 1,9m – Figuras 3.11 e 3.12.



Figura 3.11 - Fotografia do sombreamento horizontal. [Foto: Catarina Pascoal]

A screenshot of a software dialog box titled 'Shading Geometry Properties - [PalaGab_EST_GSHP_D112_6]'. The dialog box contains several input fields for defining the geometry of a horizontal overhang. The 'Name' field is set to 'PalaGab_EST_GSHP_D112_6'. The 'Reveal Depth' is set to 150.0 mm. The 'Overhang' section has 'Projection from surface' set to 1900.0 mm (circled in red), 'Height above window' set to 0.0 mm, 'Ext. past RH side of window' set to 5000.0 mm, and 'Ext. past LH side of window' set to 5000.0 mm. The 'Left Fin' section has 'Projection from surface' set to 350.0 mm, 'Height above window' set to 2000.0 mm, and 'Dist. from edge of window' set to 0.0 mm. The 'Right Fin' section has 'Projection from surface' set to 350.0 mm, 'Height above window' set to 2000.0 mm, and 'Dist. from edge of window' set to 0.0 mm. At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Shading Geometry Properties - [PalaGab_EST_GSHP_D112_6]	
Name: PalaGab_EST_GSHP_D112_6	Overhang
Reveal Depth: 150.0 mm	Projection from surface: 1900.0 mm
	Height above window: 0.0 mm
	Ext. past RH side of window: 5000.0 mm
	Ext. past LH side of window: 5000.0 mm
Left Fin	Right Fin
Projection from surface: 350.0 mm	Projection from surface: 350.0 mm
Height above window: 2000.0 mm	Height above window: 2000.0 mm
Dist. from edge of window: 0.0 mm	Dist. from edge of window: 0.0 mm
OK Cancel Help	

Figura 3.12 - Parâmetros geotérmicos da pala sombreadora horizontal, salas de aula D112 e D116. (HAP)

Relativamente ao perfil de ocupação, considera-se que em todas as zonas em estudo existe ocupação a maior parte do tempo, exceto aos fins-de-semana, feriados e férias respetivas ao ano letivo; onde a ocupação varia ao longo do dia. O perfil de ocupação considerado encontra-se caracterizado nas Figuras 3.13 e 3.14, para os gabinetes e salas de aula, respetivamente. No caso dos gabinetes, considerou-se 1 pessoa/gabinete, exceto nos gabinetes D105 e D120 onde se considerou 2 pessoas. Para a sala D116 considerou-se uma ocupação típica limite de 30 pessoas; enquanto na sala D112, 40 pessoas. Já em relação à iluminação, considerou-se:

- Gabinetes: 2 armaduras x 2 lâmpadas de 36 W = 144 W;
- Salas de aula: 6 armaduras x 2 lâmpadas de 36 W = 432 W.

A Figura 3.13 apresenta os perfis de ocupação de *design* e o perfil médio de semana. O perfil de dimensionamento (*design*), representa a utilização extrema num determinado local. Serve para entrar em conta com a variação horária das cargas térmicas internas. Aos fins-de-semana não se prevê ocupação nos gabinetes.

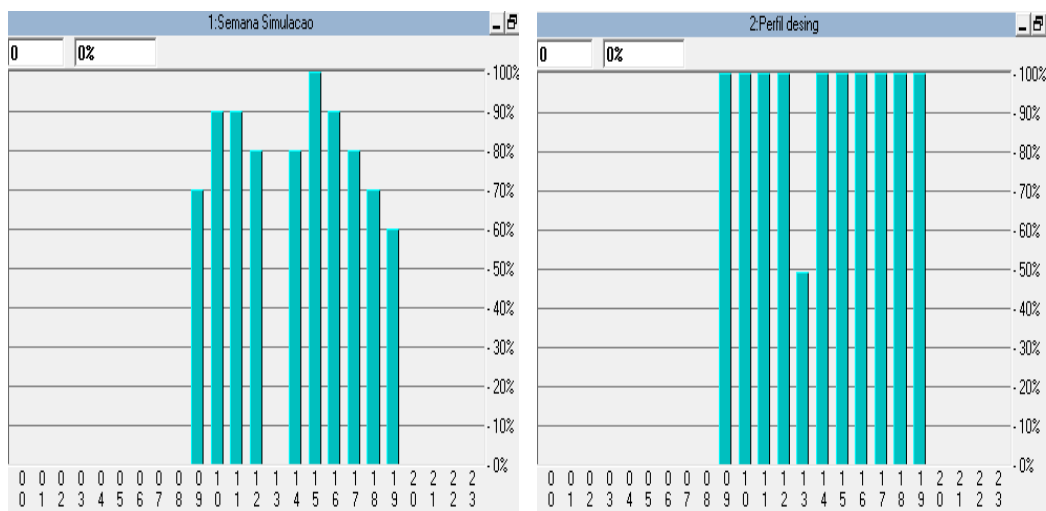


Figura 3.13 - Perfil de ocupação típico de consumo energético nos gabinetes.

A Figura 3.14 apresenta os respectivos perfis de ocupação para as salas de aula. Não se prevê ocupação durante os fins-de-semana.

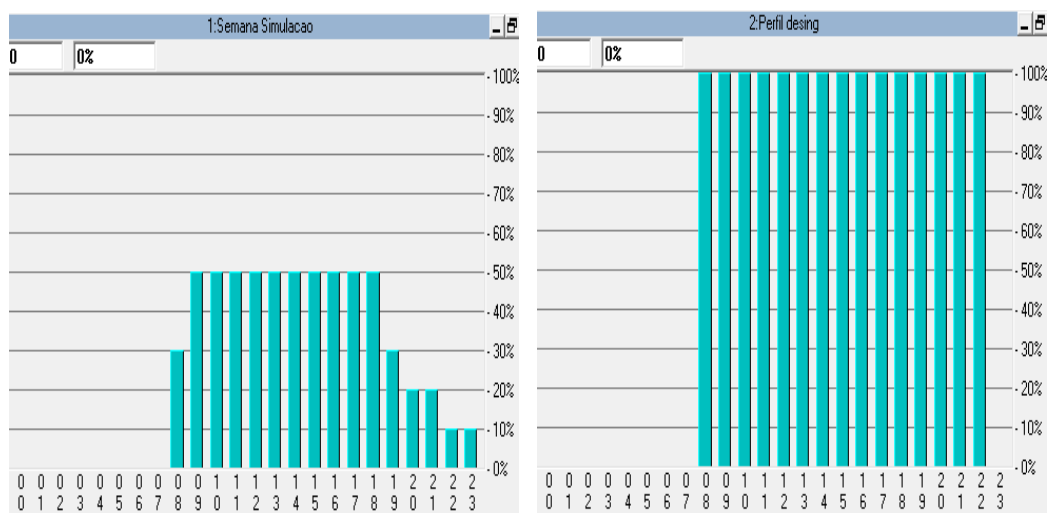


Figura 3.14 - Perfil de ocupação típico de consumo energético nas salas de aula.

(HAP)

Quanto aos perfis dos equipamentos apresentados nas Figuras 3.15 e 3.16, considerou-se um computador/pessoa quer por gabinete quer por sala de aula, exceto nos gabinetes D105 e D120 onde se considerou 2 pessoas. Aos fins-de-semana mantém-se um funcionamento dos equipamentos até 10%.

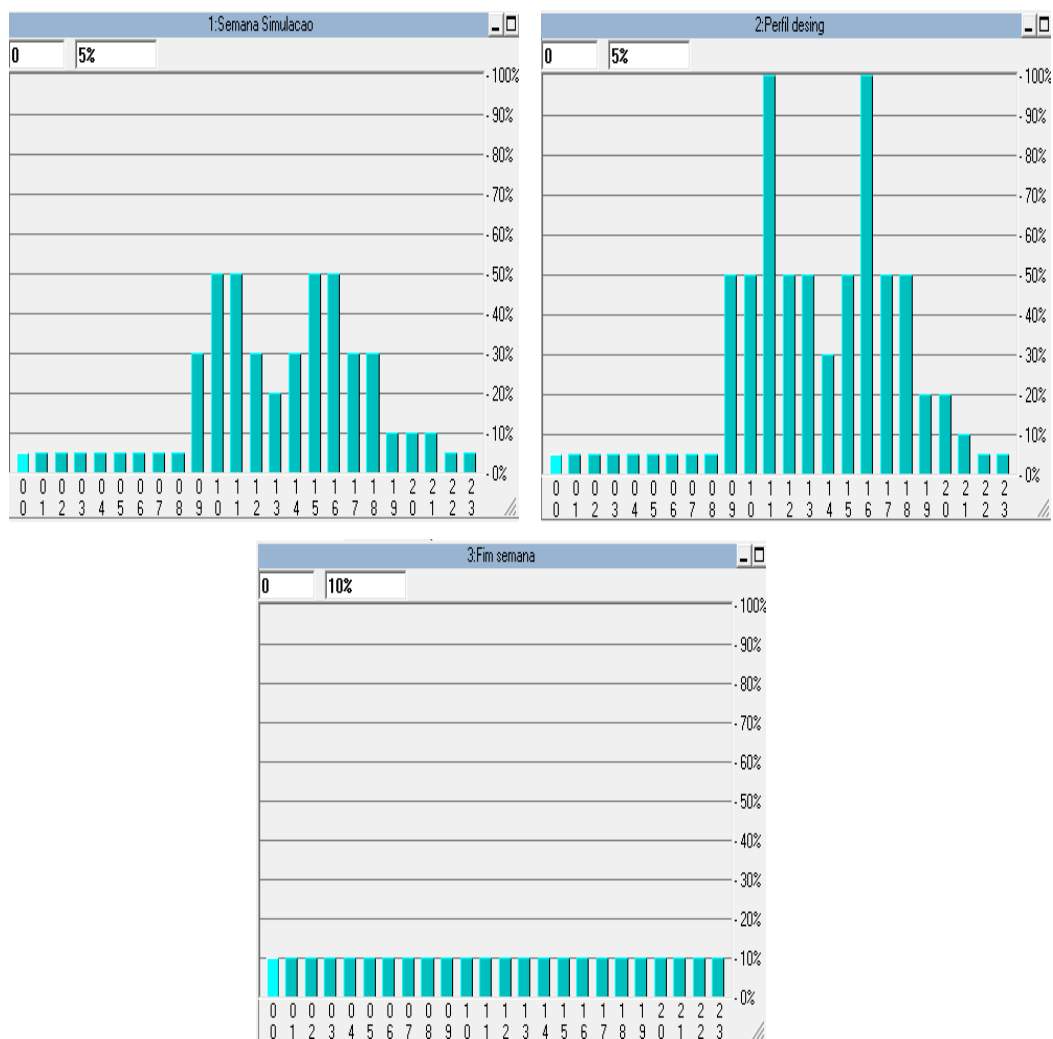


Figura 3.15 - Perfil de utilização de equipamentos nos gabinetes, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP)

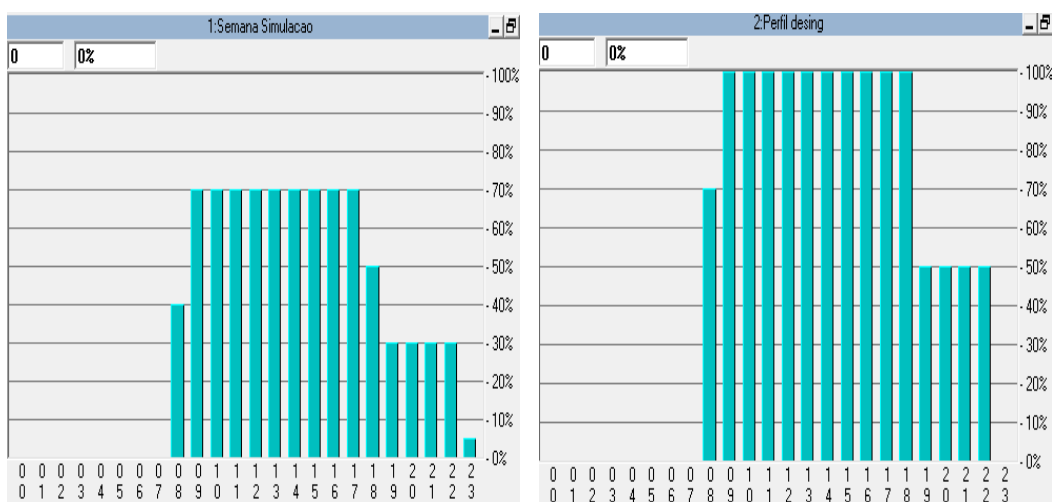


Figura 3.16 - Perfil de utilização de equipamentos nas salas de aula, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP)

Os perfis de iluminação nos gabinetes e nas salas de aula são apresentados nas Figuras 3.17 e 3.18. Aos fins-de-semana, tipicamente não se considera consumo energético derivado da iluminação.

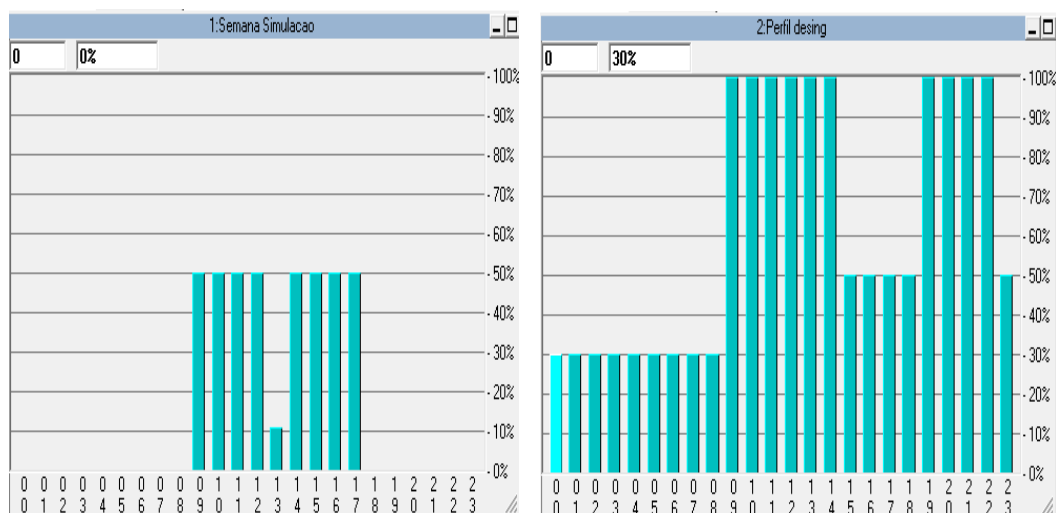


Figura 3.17 - Perfil de iluminação nos gabinetes, durante a semana e em perfil de dimensionamento. (HAP)

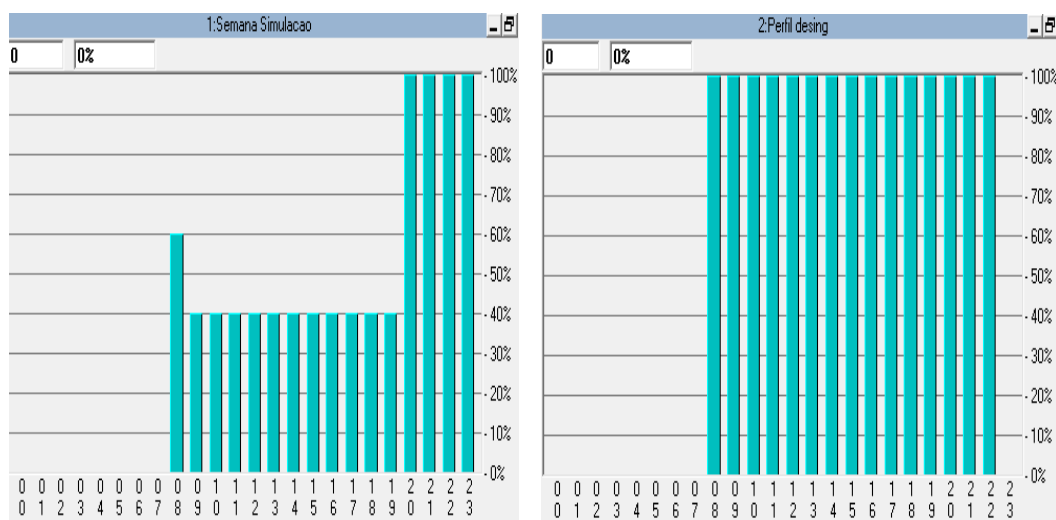


Figura 3.18 - Perfil de iluminação nas salas de aula, durante a semana, em perfil de dimensionamento e aos fins-de-semana. (HAP)

3.2. Simulação energética dos furos geotérmicos

O trabalho de simulação apresentado neste subcapítulo refere-se à simulação de furos geotérmicos verticais para permuta de energia geotérmica já instalada no IPS-ESTSetúbal, pelo que este projeto se torna um estudo paralelo ao realizado anteriormente, com o intuito de verificar concordância entre valores calculados aquando a instalação dos furos geotérmicos na ESTSetúbal, e presentemente com recurso ao TRT aos respetivos furos já existentes, cinco furos verticais com permutadores de calor instalados; dois coaxiais simples, e três Duplo U.

O programa utilizado para o efeito foi o EED 3.0. Este é um programa de PC utilizado no projeto de furos geotérmicos verticais e tipo de permutador de calor para cada caso prático particularmente. A facilidade de utilização e os tempos de cálculo rápidas e portanto uma rápida simulação e geração de representações esquemáticas, tornam este *software* uma ferramenta útil em trabalhos de engenharia diário para o projeto do sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) e furos geotérmicos. Mesmo em projetos grandes e complexos, que exijam elevado nível de fiabilidade e certeza, o EED permite para recuperar o tamanho de furo necessário aproximado ao projeto em questão e *layout* antes de iniciar a análises mais detalhadas.

Este *software* lida com configurações de um furo de água para sistemas de grande porte com até 1.200 arranjos de furos geotérmicos (em linha, em L, em U e retangular), com permutador coaxial ou em U (simples, duplo ou triplo), permitindo somente simular furos geotérmicos verticais e com profundidade compreendida entre 20 a 200 metros, e as cargas de base anual podem variar entre alguns MWh até vários TWh. O programa foi desenvolvido com base em estudos de parâmetros com um modelo de simulação numérica, resultando em soluções analíticas do fluxo de calor com várias combinações para o padrão de furo e geometria (G-funções). Essas 6385 g-funções existentes, dependem do espaçamento entre os furos na superfície do solo e da profundidade do furo. Em caso de perfurações calibradas há também uma dependência do ângulo de inclinação. Os valores g de função obtidos a partir das simulações numéricas foram armazenados num arquivo de dados, no qual é possível acesso por recuperação rápida de dados por EED. Este arquivo de dados de fácil acesso, permite avaliar um número ilimitado de cenários, até que se atinjam as condições mais favoráveis. Para além de fornecer a

possibilidade de otimizar a instalação através de uma listagem das melhores soluções para vários parâmetros dentro dos limites especificados, permite ainda estudar a solução mais económica através da introdução dos custos associados ao processo de perfuração do solo e materiais associados.

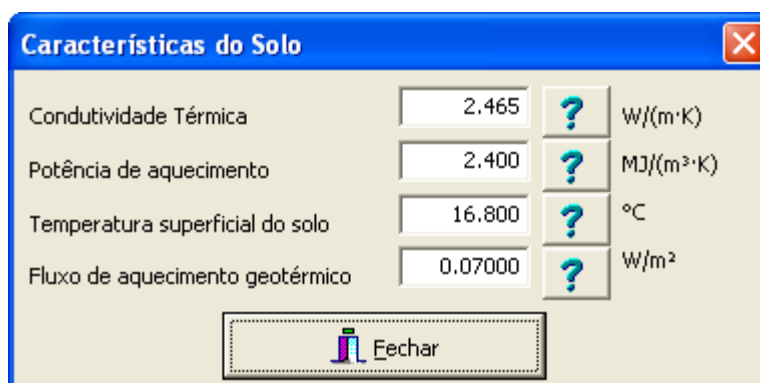
O cálculo das temperaturas do EED é feito para calor/cargas legais mensais. As bases de dados fornecem os principais parâmetros de solo (condutividade térmica e calor específico), bem como propriedades dos materiais de tubagem e fluidos de transporte de calor. As cargas de aquecimento e arrefecimento médios mensais são os dados de entrada. diferentes métodos para estabelecer um perfil de carga mensal. No final da simulação, é emitido um relatório com os valores introduzidos, e respetivos parâmetros obtidos, bem como gráfico com os parâmetros obtidos. O programa tem uma interface fácil de usar. A resistência térmica furo é calculado no programa, utilizando a geometria furo, constituição do material, material do tubo e da geometria. O padrão de perfuração pode ser escolhida à vontade a partir de um banco de dados de 800 configurações básicas.

No presente caso, realiza-se o cálculo de otimização dos furos geotérmicos verticais, para que seja possível comparar o desempenho de diferentes arranjos de furos: em número, em comprimento, disposição e tipo de permutador associado. É relevante associar a esta otimização o custo ótimo de instalação, sendo que é possível reduzir o preço de instalação consoante o número de furos for superior/inferior. No caso do número de furos for superior, é possível reduzir o comprimento total dos furos, caso estes estejam bem distribuídos. Os dados necessários referentes as cargas térmicas, foram conseguidos através da simulação energética realizada à área em estudo, pelo *software* HAP, pelo que a informação detalhada acerca deste programa, encontra-se apresentada no subcapítulo anterior. [28] [29]

Ao longo do presente subcapítulo, procede-se à apresentação e descrição sucinta dos valores introduzidos no programa EED.

Na Figura 3.19, estão apresentados os parâmetros introduzidos acerca das características do solo, nomeadamente a condutividade térmica obtida através da média das condutividades térmicas obtidas pelos testes TRT efetuados aos furos geotérmicos verticais existentes; a potência de aquecimento, a temperatura superficial do solo e o fluxo de aquecimento geotérmico - parâmetros considerados, por defeito, e fornecidos pelo

programa.



Propriedade	Valor	Ícone	Unidade
Condutividade Térmica	2.465	?	W/(m·K)
Potência de aquecimento	2.400	?	MJ/(m³·K)
Temperatura superficial do solo	16.800	?	°C
Fluxo de aquecimento geotérmico	0.07000	?	W/m²


 Echar

Figura 3.19 - Características do solo introduzidas no programa EED.

Já nas propriedades referentes ao furo geotérmico e permutador de calor instalado – Figura 3.20, para o efeito do estudo considerar-se-á instalada somente a configuração de permutador de calor vertical do tipo Duplo U, para simplificação, com uma configuração de 5 furos geotérmicos. Todos os furos, têm uma profundidade de 80 metros encontrando-se equidistantes, com um espaçamento de cerca de 5m; o diâmetro destes furos é de 140mm pelo que resistência do contacto entre o tubo e o enchimento corresponde a 0,02 (m.°C)/W; a condutividade térmica do solo, conforme define o EED, é considerada como sendo 0,8 W/(m.°C) – Figura 3.21. Já o parâmetro do caudal volúmico considerado para os cinco furos que servem as duas bombas de calor foi de 1,430 l/s; e respetivas características da tubagem – Figura 3.20, nomeadamente uma tubagem de 32mm de diâmetro externo, parede de 2mm, com 70mm de espaçamento – Figura 3.22.

Furo e Permutador de calor

Sonda

Tipo: U duplo

Configuração: 102 ?
102 ("5 : 3 x 2, U-configuration")

Profundidade: 80.0 m

Distância: 10.0 m

Diâmetro: 140.000 ? mm

Resistência de contacto tubo /enchimento: 0.0200 (m·K)/W

Condutividade Térmica do Enchimento: 0.800 ? W/(m·K)

Número Renovações / Volume Q:
☒ para todos os furos ☐ por furo

Factor de série (1=paralelo): 1 $Q_{bh}=Q/(Nbh/fac)=0.286$ l/s

Tubagem em U

Diâmetro externo: 32.000 mm

Espessura da Parede: 2.000 ? mm

Condutividade Térmica: 0.420 W/(m·K)

Distância entre tubos: 70.000 mm

Diagrama:

Distância entre tubos: 108 (felicidade) / 45.255 (tristeza)

Copiar para Área de Transferência

Fechar

Figura 3.20 - Propriedades do furo geotérmico e permutador de calor

Condutividade Térmica do Enchimento...

Converter valores
☒ Não ☐ SI => ENG ☐ ENG => SI

Ice at -10 °C	recommended 2.3	actual 2.32
Ice at 0 °C	recommended 2.2	actual 2.20
Water at 0 °C	recommended 0.6	actual 0.56
Water at 10 °C	recommended 0.6	actual 0.59
Concrete	recommended 1.6	minimum 0.92
	maximum 2.02	
Bentonite 10%, in water	recommended 0.7	minimum 0.65
	maximum 0.77	
Bentonite 10 %, frozen	recommended 1.4	
Bentonite 20%, in water	recommended 0.6	minimum 0.64
	maximum 0.66	
Bentonite 40%, in water	recommended 0.6	minimum 0.53
	maximum 0.82	
Bentonite 40 %, frozen	recommended 0.9	
Bent. /Cem. /Sand 8.5/13/26.5%	recommended 0.8	
Bent. /Cem. /Sand 9/9/20%	recommended 0.7	
Bent. /Cem. /Sand 9/9/27%	recommended 0.8	
Bent. /Cem. /Sand 9.5/9.5/15%	recommended 0.7	
Bentonite/Sand 12/50%	recommended 1.5	
Bentonite, dry	recommended 0.14	
Sand, frozen		

Figura 3.21 - Condutividade térmica do enchimento

Tubagem em U

Converter valores
☒ Não ☐ SI => ENG ☐ ENG => SI

PE DN25 PN6
d=25 mm t=2.0 mm l=0.42

PE DN32 PN6
d=32 mm t=2.0 mm l=0.42

Figura 3.22 – Propriedades furo geotérmico e permutador de calor: Tubagem em U.

Já relativamente à resistência térmica do furo (fluido/solo e interna) é calculada automaticamente pelo EED – Figura 3.23:

Figura 3.23 - Parâmetros de resistência térmica do permutador de calor.

Quanto ao parâmetro do fluido frigorígeno, neste caso água a 20 °C, é possível seleccionar os parâmetros relacionados a partir da base de dados do EED que contém as suas propriedades, e por sua vez predefinem os valores da condutividade térmica, potência específica de aquecimento, densidade, viscosidade e ponto de congelamento – Figura 3.24.

Figura 3.24 - Propriedades do fluido frigorígeno.

Aquando a introdução das cargas térmicas, recorre-se aos resultados obtidos através da simulação energética realizada no HAP para preenchimento do parâmetro. As Figuras 3.25 e 3.26 representam os valores mensais de energia.

Carga Térmica

Carga Térmica (sem AQS):

☐ Perfil de energia anual e mensal

☒ Valores mensais de energia:

[MWh]	Calor	Frio	solo
Anual	2.371	18.307	Actualizar
SPF	5.00	5.00	
	<input type="checkbox"/> Directo	<input type="checkbox"/> Directo	
Janeiro	2.585	0.000	2.068
Fevereiro	1.572	0.012	1.243
Março	0.540	0.037	0.388
Abril	0.171	0.074	0.048
Maio	0.095	0.679	-0.739
Junho	0.000	2.267	-2.720
Julho	0.000	4.463	-5.356
Agosto	0.000	0.000	0.000
Setembro	0.000	3.141	-3.769
Outubro	0.014	0.499	-0.588
Novembro	0.395	0.060	0.244
Dezembro	1.930	0.003	1.540
Soma:	7.302	11.235	-7.6404

Água quente doméstica (AQS):

Anual SPF

Figura 3.25 – Valores mensais de energia – Carga térmica (recolhidos simulação HAP).

Pelo que, a representação gráfica da Figura 3.26, mostra que existe algum equilíbrio térmico ao longo do ano, uma vez que a maior parte da carga térmica injetada no solo durante a estação de arrefecimento é praticamente compensada pela carga energética retirada durante a estação de aquecimento.

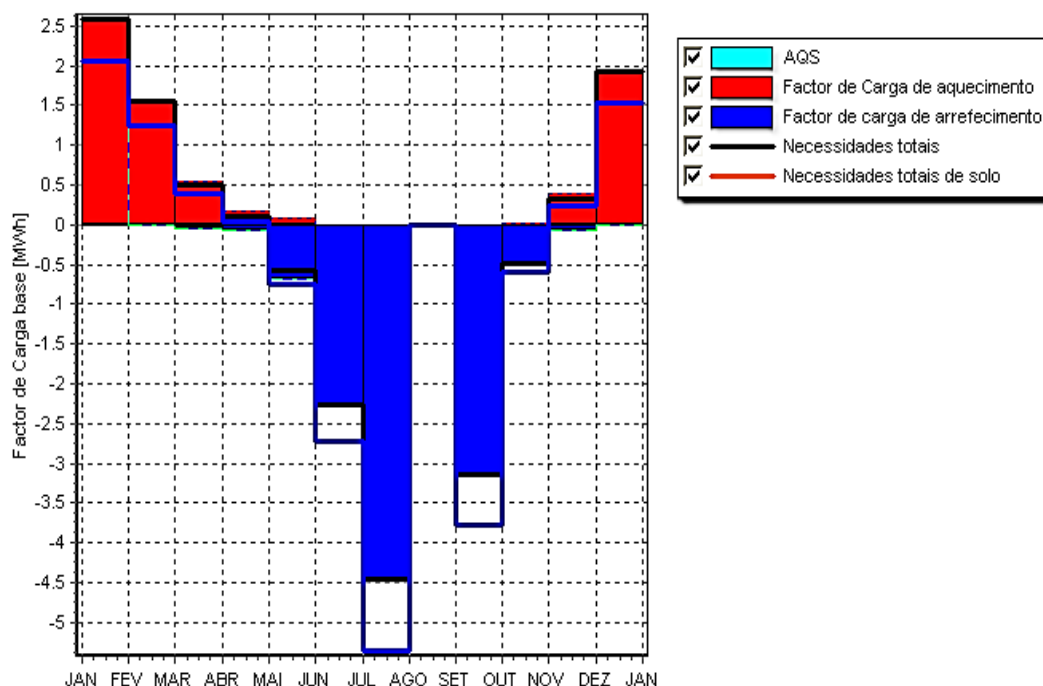


Figura 3.26 – Valores mensais de energia – Carga térmica.

Para a presente simulação dos furos geotérmicos verticais, considerou-se o período de simulação de 25 anos, pelo que é pertinente conhecer as condições do solo ao fim desse período.

É possível ainda especificar um valor, em euros, por metro linear de furo para avaliação do custo da instalação. Para o efeito considerou-se que o custo de perfuração por metro linear seria 40 €/m; e 35€/m de perfuração opcional do solo por metro linear.

Uma vez introduzidos todos os parâmetros associados às condições iniciais de simulação, é possível testar a instalação. Uma vez que se conhece a profundidade total da instalação ($5 \times 80 \text{ m} = 400 \text{ metros}$), resta otimizar a configuração, distribuindo a profundidade total pelo número de furos, fazendo estudo das seguintes variáveis: económica, técnica, e termicamente mais favorável/pertinente.

Os resultados obtidos relativamente à simulação realizada, encontram-se devidamente apresentados e comentados no ponto 5.2.

Capítulo 4

Estudo de implementação do TRT – Caso Prático

Neste capítulo, apresenta-se o trabalho de acompanhamento do projeto e desenvolvimento de um TRT, desde a calibração até aos tratamentos de dados obtidos através dos testes realizado, fazendo uma descrição de todos os parâmetros considerados. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no ponto 5.3.

4.1. Introdução

O TRT é um método de avaliar as características chave do comportamento térmico do terreno e consecutivamente uma forma de obter uma estimativa dos rendimentos de transferência térmica tendo em conta as principais características a determinar, nomeadamente a condutividade térmica, a resistência térmica no interior do furo e as condições térmicas do terreno. O TRT é utilizado a fim de ser possível dimensionar com segurança um sistema de climatização geotérmica.

Em suma, a resposta térmica do furo corresponde à evolução da temperatura do fluido de transporte ao longo do tempo, em regime transiente, em resposta a uma potência de aquecimento estável. O Teste de Resposta Térmica permite assim conhecer as propriedades térmicas do furo geotérmico e terreno envolvente, importantes para um correto dimensionamento.

Este projeto, realizado pelo Instituto Politécnico de Setúbal (IPS) – Figura 4.1, em parceria com a entidade *Synege*, terá sido o primeiro a ser construído em Portugal – Ver a preparação do artigo científico, Anexo I.



Figura 4.1 - Local desenvolvimento experimental do TRT. [Google Earth]

O TRT foi desenvolvido nas instalações do IPS, onde já existiam cinco furos geotérmicos, com profundidade de 80m, com um diâmetro de 140mm cada; instalados na Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (ESTS) nomeadamente três permutadores de calor duplo-U e dois permutadores de calor coaxiais simples. A instalação possuía já de

duas bombas de calor geotérmicas instaladas com capacidade de aquecimento de 15 kW e 12 kW arrefecimento cada, com distribuição feita através de ventiloconvectores a dois tubos – Figura 4.2.



Figura 4.2 - Bombas de calor geotérmicas.

A anterior instalação beneficiava de um solo com boa condutividade térmica e existência de água subterrânea. Em termos de COP, a bomba de calor obteve 6,05 para uma potência de aquecimento de 12,11 kW e uma potência elétrica de 2 kW – Figura 4.3.

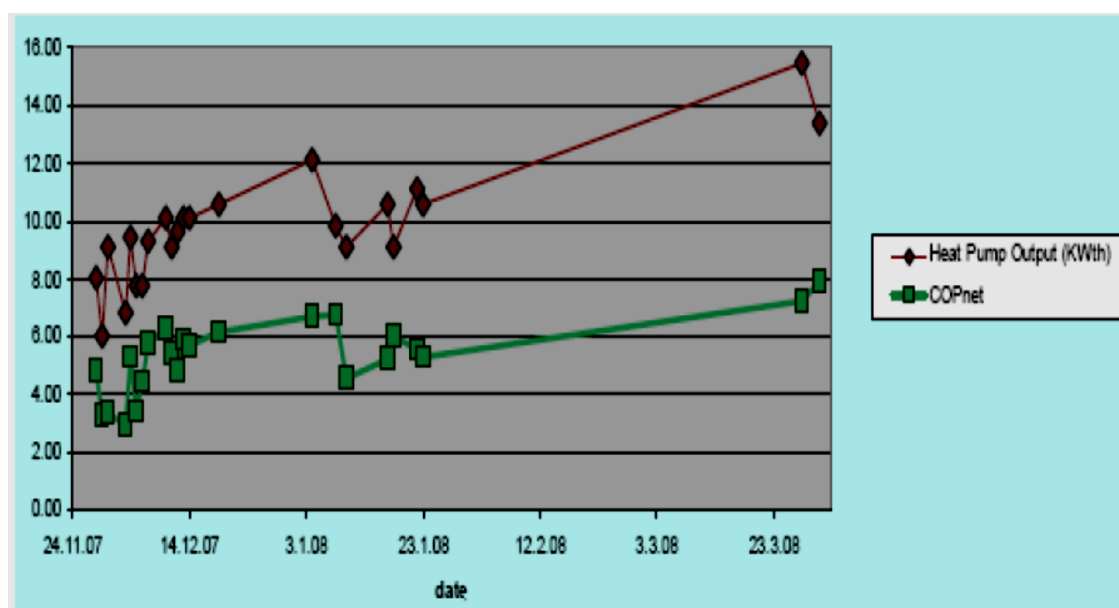


Figura 4.3 - Energia de aquecimento produzida e respetivo COP. [19]

O sistema usa R410A como fluido refrigerante, compressores de alta eficiência, evaporador duplo contracorrente e equicorrente e um condensador de alta capacidade.

Posteriormente, e após desenvolvimento do TRT em ambiente laboratorial, o equipamento foi colocado em campo a fim de estudar a sua viabilidade. O local escolhido para estudo/análise do TRT foi a Quinta da Ombria, Loulé, localizada no Algarve – Figura 4.4, onde foram testados três furos com permutador de calor duplo U.

O local em causa, necessitava de uma avaliação TRT com o intuito de validar os furos geotérmicos concretizados na obra, com prospeções de ser um *hotel & spa castle and golf resort* – Ver relatório realizado acerca da instalação dos furos no Anexo II; e mapa com disposição furos geotérmicos instalados na Quinta da Ombria, no Anexo XII.



Figura 4.4 – Localização da Quinta da Ombria, Loulé. [Google Earth]

Ao longo deste capítulo, realiza-se a descrição dos testes de resposta térmica nomeadamente a metodologia experimental e tratamento de dados. Os resultados obtidos e posterior conclusão quer para a ESTSetúbal, em ambiente laboratorial; quer no Algarve, realizando monitorização *in situ*. poderão ser encontrados nos capítulos 5 e 6 respetivamente.

4.2. Metodologia experimental

4.2.1. Descrição do equipamento TRT

A base de um TRT é injetar no subsolo, através das sondas de um furo geotérmico, uma quantidade conhecida de energia constante durante um tempo suficientemente longo. O equipamento aquece um meio circulante (água ou anticongelante) que flui através do permutador de calor (sondas geotérmicas). A resposta da temperatura do fluido circulante é medida durante esse tempo e é usada para inferir as características térmicas do solo. Os dados obtidos são analisados através da aproximação à *line source theory*. A precisão da aproximação à teoria depende da existência de um teste de longo e uma taxa de energia estável suficiente. O equipamento é gerido através de um *software* que recebe os dados por GSM. Com esta aplicação, é possível seguir todos os testes através de conexão remota.

O TRT tem duas conexões, dois tubos PEAD devidamente isolados, que se encontram interligados ao furo geotérmico vertical. Os parâmetros recolhidos por GSM são as temperaturas de entrada no permutador (T_1) e saída (T_2) e medidor de caudal (F) e Potência elétrica das resistências. Conforme apresenta a Figura 4.5, e com recurso a uma estrutura metálica composta por aço inoxidável que sustenta todo o equipamento, o TRT é composto pelos seguintes componentes:

1. Sensor de Temperatura de entrada (T_2);
2. Medidor de Caudal;
3. Válvula de regulação;
4. Vaso de Expansão;
5. Válvula de Enchimento;
6. Resistências elétricas – 3 kW cada;
7. Sensor de Temperatura de saída (T_1);
8. Válvula de Segurança;
9. Bomba de circulação;
10. Purgador;
11. Manómetro;
12. Sensor de Temperatura (T_3) – entrada do permutador de calor, junto ao furo.

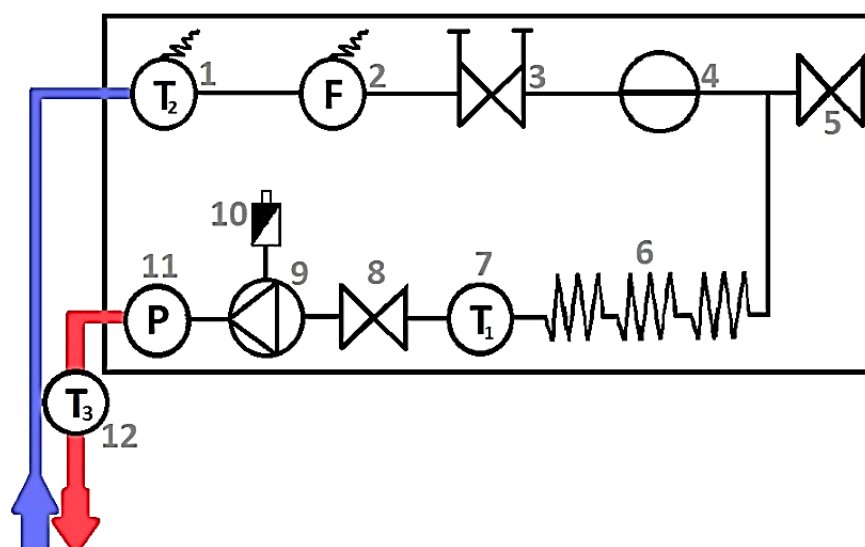


Figura 4.5 - Esquema da instalação do TRT

4.2.2. Calibração e teste do Equipamento TRT

Como em qualquer teste experimental, existe alguma incerteza para cada medição. Esses erros são agravados quando as medições são usadas para calcular outros parâmetros. Portanto, é desejável minimizar incertezas pelo cuidado com a calibração dos sensores e equipamentos de aquisição de dados. O TRT recolhe dados de três tipos: temperatura, caudal e potência da bomba. Cada dispositivo é calibrado de forma independente e, em seguida, é realizada uma verificação conjunta.

Desta forma, numa fase inicial do teste e após montagem do TRT, procedeu-se à calibração dos equipamentos, onde foram testados os sensores de temperatura, o caudalímetro e ainda as diferentes posições de potência do TRT. Estas calibrações foram possíveis uma vez que foi desenvolvido um suporte de aquisição de dados – Figura 4.6, que recolhe informação através dos sensores de temperatura, do medidor de caudal e ainda da potência elétrica das resistências.

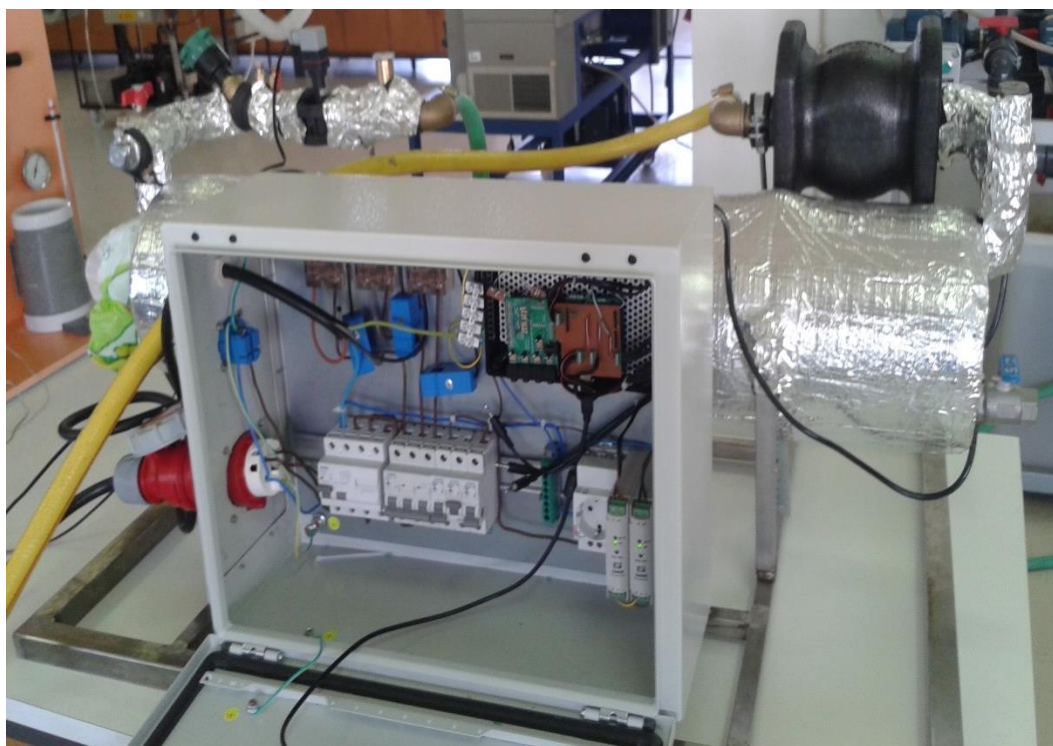


Figura 4.6 - Equipamento da aquisição de dados (GSM). [Foto: Catarina Pascoal]



Figura 4.7 - Calibração sensores de temperatura. [Foto: Catarina Pascoal]

A calibração realizada aos sensores de temperatura - Figura 4.7, foi executada com recurso a água destilada, utilizada na amostra; medidores de temperatura, disponibilizados pelo laboratório; bancada medidora de temperatura; resistências controladoras da temperatura da água a medir pelos sensores da instalação geotérmica e do laboratório, e passou por:

1. Verificar a leitura dos valores obtidos em suporte informático;
2. Colocar os sensores de termometria na água, assim como os medidores de temperatura existentes no laboratório;
3. Ler valores recolhidos na ausência das resistências, valores correspondentes à temperatura ambiente;
4. Fazer variar a temperatura da amostra; através da resistência foram recolhidos os valores correspondentes a fim de verificar a coerência entre ambos, e assim verificar a viabilidade dos sensores a utilizar no TRT.

Do qual se obteve os valores apresentados na Tabela 4.1 e Figura 4.8, resultados da experiência de calibração efetuada às sondas de temperatura.

Tabela 4.1 - Estudo de calibração dos dispositivos de termometria da instalação geotérmica.

Experiência	Temperatura Medida (Sensor) [°C]		Temperatura Referência [°C]		Nota
	Tmax	Tmin	Platina	ORTD	
1	24,29	24,21	24,4	24,2	Temperatura ambiente (sem resistências)
2	28,1	27,5	27,7	27,8	Com resistência (posição 2)
3	29,1	28,8	29	29	Com resistência (> temperatura)
4	35,2	34,8	35,3	35,1	Com resistência (> temperatura)

Nota: Fazendo variar a temperatura da amostra (água destilada) através das resistências térmicas, obtém-se os respetivos valores medidos pelos dispositivos fornecidos para a experiência e pelos dispositivos de termometria pertencentes à instalação geométrica. Assim, é possível verificar a viabilidade dos dispositivos da nova instalação.

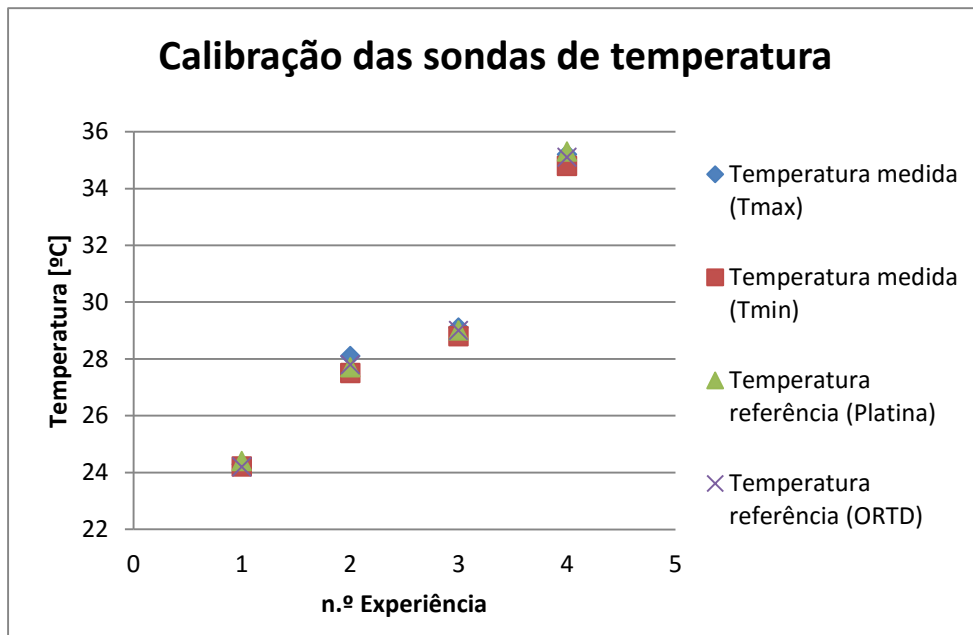


Figura 4.8 - Calibração das sondas de temperatura

Posteriormente, a fim de para dar início à calibração do caudalímetro foi necessário previamente ferrar a bomba, uma vez que a bomba pode ficar danificada devido à acumulação de ar no interior do depósito de água, é necessário retirar o ar de dentro do depósito e posteriormente encher novamente o depósito; ligar os sensores de temperatura do equipamento; e, por fim, ligar a bomba de calor geotérmica.

O estudo e calibração ao caudalímetro passaram por verificar se o valor do caudal medido (sensor) através do dispositivo instalado no circuito do equipamento correspondia ao valor real conseguido através da experiência feita em laboratório.

Uma vez que a bomba de calor não estava a funcionar bem devido a infiltrações de ar de origem desconhecida, efetuou-se o estudo da instalação para fazer variar somente a quantidade de caudal, uma vez que era somente essa variável que estava a ser analisada. Mesmo recorrendo a um purgador manual da instalação não foi possível verificar a ausência do ar no interior do depósito, algumas oscilações, reduções, mas nunca ausência.

Uma vez estabilizados os valores obtidos em suporte informático a partir dos sensores instalados, passou-se a verificar o caudal usando um tanque disponível no laboratório. Aqui, foi possível, através de um cronómetro, verificar quanto tempo demorava a passagem de 50l de água, recolhendo o valor observado – Figura 4.9.



Figuras 4.9 - Calibração do medidor de caudal. [Foto: Catarina Pascoal]

Posteriormente, observa-se os valores lidos pelos dispositivos e procedia-se ao estudo comparativo para verificar a viabilidade dos leitores – Tabela 4.2, Figura 4.10.

Tabela 4.2 - Estudo de calibração do caudalímetro da instalação geotérmica.

Experiência	Quantidade [l]	Duração [min]		Caudal Medido (Sensor) [l/min]	Caudal Real (Tanque) [l/min]	Desvio [l/min]
1	50	3 min	3	16,75	16,67	0,09
2	50	3 min 30 seg.	3,5	13,86	14,29	-0,42
3	50	5 min 39 seg.	5,65	7,90	8,85	-0,95
4	50	8 min 50 seg.	8,83	4,49	5,666	-1,18

Nota: Sempre com a mesma quantidade de água (50 l), fez-se variar apenas a pressão da água. Assim é possível verificar a viabilidade do caudalímetro da instalação geotérmica, comparando os valores medidos dos valores reais obtidos através da experiência realizada.

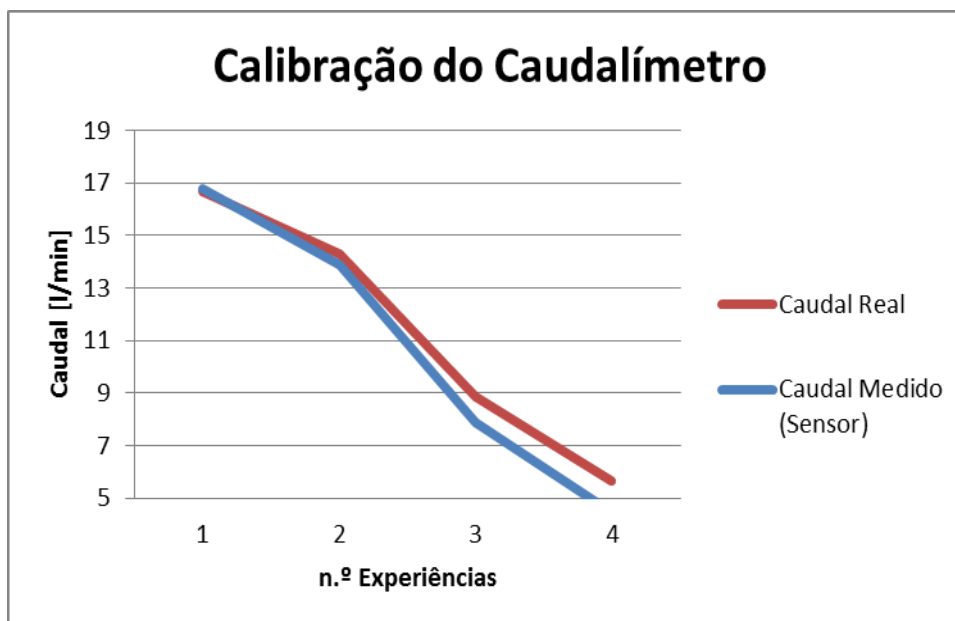


Figura 4.10 - Representação gráfica da calibração do caudalímetro

Mais tarde, tendo em conta que era necessário arranjar forma de impedir a passagem de ar no circuito (pois influência os valores recebidos de caudal) a fim de contornar esta questão para desenvolvimentos futuros, considerou-se a possibilidade de colocar a bomba de calor na vertical a fim de permitir a libertação do ar pela purga com mais facilidade. No entanto, manteve-se a orientação inicial do TRT, na horizontal, sendo que a opção adotada de resolução do problema passou por recorrer à instalação de um purgador, para permitir libertar o ar acumulado no interior da bomba de circulação.

Os valores recolhidos pelos sensores de temperatura e o caudalímetro, acima apresentados, mostram que os dispositivos estão devidamente calibrados e são viáveis os valores recolhidos/recebidos/lidos em suporte digital.

4.2.3. Teste de Resposta Térmica

O desempenho térmico de um sistema de bomba de calor geotérmica é comumente estimado através da simulação numérica do permutador de calor, devendo ser confirmado após a execução do primeiro furo efetuado por um Teste de Resposta Térmica (TRT).

Como referido anteriormente, o TRT permite determinar as propriedades térmicas do solo com alguma certeza, o que permite realizar uma estimativa dos rendimentos de transferência térmica tendo em conta as principais características térmicas, nomeadamente a condutividade térmica, a resistência térmica no interior do furo e as condições térmicas do solo. Após esta análise, os resultados obtidos do TRT permitem dimensionar com segurança um sistema de climatização geotérmica.

As principais especificações para a realização de um TRT, identificados pela Agência Internacional de Energia (IEA) e pela Associação Internacional de Bomba de Calor Geotérmicas (IGSHPA) são:

- O teste deverá ter uma duração acima das 36 horas de acordo com o IGSHPA e acima de 50 horas de acordo com a IEA;
- Aguardar três a cinco dias entre execução de perfuração e o início do teste;
- Garantir um caudal de fluido que permite funcionar em regime turbulento;
- São recomendados valores de diferencial de temperaturas 3 a 7 ° C entre o caudal de ida e retorno;
- A medição inicial da temperatura do solo não perturbado, que deve ser feita no fim do período de equilíbrio da temperatura de ida e retorno do fluido de circulação, antes da injeção de calor;
- As partes do circuito acima do solo, incluindo as pertencentes ao equipamento, devem ser bem isoladas para limitar a perda de calor em menos de 2%.

Todos estes requisitos foram respeitados durante os testes. [30] [31] [32]

SETÚBAL

O TRT, desenvolvido nas instalações do IPS, testou os cinco furos geotérmicos já existentes, com profundidade de 80 m cada, nomeadamente três permutadores de calor duplo-U e dois coaxiais simples. Após calibração de diferentes componentes do equipamento, testou-se o TRT ligando o mesmo a um dos furos, a fim de verificar a viabilidade dos resultados obtidos dos parâmetros em estudo, através da aquisição de dados. Na instalação existe coletor de ida e de retorno, ambos usufruem de uma ligação de reserva disponível. A ida e retorno da água do TRT foram ligados às respetivas reservas disponíveis dos coletores.

Durante a execução do teste ao TRT foram fechadas todas as válvulas inclusive as que ligam os tubos dos coletores às bombas de calor, deixando apenas a válvula do furo a testar. Em simultâneo foi-se testando também a purga do ar, com o intuito de retirar todo o ar acumulado no interior do depósito de água, causado pela instalação das demais ligações. Durante o processo, ligou-se a bomba de circulação a uma velocidade próxima da máxima e verificou-se o caudal no rotâmetro e a pressão à saída da bomba.

Por fim, ligou-se o equipamento dos dados ao TRT para se efetuar comparação entre as diferentes formas de obtenção de valores de caudal, nomeadamente através do rotâmetro e da aquisição de dados, e analisar a evolução das temperaturas de água de ida e de retorno.

Quando os valores das temperaturas se tornaram coerentes e estabilizaram, considerou-se esse o valor da temperatura do solo. De seguida, ligou-se as três resistências elétricas e verificou-se que a evolução das temperaturas de ida e de retorno foram aumentando. O equipamento permaneceu ligado pelo menos 72 horas. Ao desligar o equipamento, antes de mais desligou-se as resistências elétricas mantendo a bomba em funcionamento, com circulação de água e posteriormente desligou-se a bomba sem se definir/estabelecer tempos. Ainda se manteve o equipamento em funcionamento no período de cerca de uma hora até ser desligado na totalidade.

Antes de iniciar a medição a um outro furo, foi necessário aguardar que o sol repusesse a temperatura sem que se perturbasse o ensaio com o teste feito anteriormente. Assim, após um período de 24 horas de repouso, deu-se início a um novo teste ao TRT noutro furo, dos cinco, e assim sucessivamente. A fim de testar o furo seguinte, foram fechadas as válvulas do furo utilizado anteriormente para realizar o teste, e abriram-se as válvulas junto aos coletores do furo a ensaiar. Posteriormente, repete-se todo o processo,

apenas com a nota de que após ligar a bomba verificou-se se as temperaturas de ida e de retorno se estavam próximas/se igualaram da temperatura do solo verificado anteriormente, para confirmar a conformidade com os valores registados no primeiro ensaio, antes da temperatura ter sido perturbada, isto é, terem sido ligadas as resistências.

ALGARVE

Após calibração e testes efetuados ao TRT em ambiente laboratorial, o equipamento foi colocado em campo a fim de consolidar informação/dados e confirmar a sua viabilidade. O local escolhido para estudo/análise do TRT foi a Quinta da Ombria *hotel & spa castle and golf resort*, localizada no Loulé - Algarve, onde foram testados três furos com permutadores de calor Duplo U. O local em causa, necessitava de uma avaliação TRT com o intuito de validar os furos geotérmicos realizados na obra – Figura 4.11.

Todo o processo de teste dos furos foi realizado conforme anteriormente.



Figura 4.11 – Teste de Resposta Térmica Energesis, *in situ*.

4.2.4. Teoria da Fonte Linear

Para se efetuar o tratamento de dados experimentais, é necessário recorrer à Teoria da Fonte Linear. A teoria da fonte linear é a abordagem mais comum aplicado para fins de avaliação/análise dos dados experimentais obtidos através do TRT, realizando uma modelagem das trocas de calor efetuadas através dos permutadores de calor instalados nos furos geotérmicos como uma infinita fonte de linhas, assumindo que o chão/solo é um meio homogêneo. Variáveis como a geometria dos furos geotérmicos e as propriedades térmicas são modelados implicitamente através da introdução de uma resistência térmica.

A evolução temporal da temperatura média do fluido T_f (média aritmética de entrada e de saída temperaturas de fluidos) pode ser calculada de acordo com a linha fonte teoria como:

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} [\ln t] + \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q} \times R_b}{H} + T_0 \quad [Eq. 1]$$

A aplicação da [Eq.1] para o problema real está relacionado com um erro sistemático que diminui ao longo do tempo, enquanto o raio térmico em torno do orifício aumenta. A [Eq. 1] pode ser traduzida sob a forma:

$$T_f(t) = c_1 \times \ln t + c_2 \quad [Eq. 2]$$

A condutividade térmica e a resistência térmica, podem ser calculadas, comparando as [Eq. 1] e [Eq. 2] quando os parâmetros da curva c_1 e c_2 são conhecidos.

Estes modelos analíticos são capazes de representar o valor com grande precisão. No entanto, estes são difíceis de implementar uma vez que exigem maior esforço computacional e a qualidade dos resultados é influenciada pelo conhecimento dos parâmetros relacionados com o permutador de calor, como dimensão e espaçamento. [33] [34]

4.3. Tratamento de dados

Nos sistemas geotérmicos, modelagem de fenômenos de transferência de energia entre o permutador de calor e o subsolo é de extrema importância, uma vez que permite otimizar o projeto do sistema e obter uma alta eficiência no consumo de energia.

Na teoria, é recomendado que o TRT tenha uma duração de, pelo menos, 50 horas consecutivas. Esta recomendação é dada, tendo em conta que o TRT é um processo transiente, relativamente lento e dependente de vários parâmetros geotérmicos.

Foram efetuados testes de resposta térmica do solo à instalação, em modo de aquecimento, de acordo com o método *Line Source Theory*. A curta duração de alguns dos testes foi possível devido à rápida estabilização das temperaturas (aproximadamente à 5ª hora de teste). Os parâmetros recolhidos são as temperaturas de entrada no permutador (T_1) e saída (T_2) e medidor de caudal (F) e Potência elétrica das resistências – Figura 4.5, referente à representação esquemática do equipamento TRT, localizada no subcapítulo 4.2.1. Para o efeito, são utilizados os valores constantes, nomeadamente:

- 80 m de profundidade do furo;
- 140 mm de diâmetro;
- 1000 J/(kg.K) de Capacidade específica do solo ($c_{p \text{ solo}}$);
- 4,187 J/(kg.K) de Capacidade específica da água ($c_{p \text{ água}}$);
- 0,576 relativo à Constante de Euler (γ);
- 2600 kg/m³ de Massa específica do solo (ρ);
- 19 - 20 °C Temperatura do solo não perturbada. [35] [36]

Foram testados dois tipos de permutador de calor verticais enterrados, nomeadamente três Duplo U, tubo do tipo PEAD com 32 mm de diâmetro; e dois Coaxiais, tubo do tipo PEAD, com 32 mm de espessura do tubo interior e 60 mm de espessura do tubo exterior.

É de salientar que no cálculo foram retirados os dados de medição do TRT correspondentes aproximadamente a 7,5 horas iniciais de funcionamento consecutivo após arranque da bomba de circulação, a fim de estabilizar a taxa de calor trocada pelo solo, com a finalidade de verificar coerência dos valores obtidos.

No subcapítulo 5.3, Tabela 5.10 e 5.11, são apresentados os resultados obtidos através dos testes efetuados na ESTSetúbal e Quinta da Ombria, respetivamente; nomeadamente T_1 ; T_2 e F , são analisados e tratados a fim de obter parâmetros relevantes para o estudo em questão, tendo em conta valores apresentados anteriormente, nomeadamente:

- Temperatura média do Fluido, determinada através da média Aritmética das temperaturas de entrada e saída, T_1 e T_2 , respetivamente, obtida através da Teoria de fontes lineares (*linear source theory*) (Eq. 1 e Eq. 3) : [37]

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} [\ln t] + \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q} \times R_b}{H} + T_0 \quad [Eq. 3]$$

- Potência, quantidade de energia sob a forma de calor concedida por uma fonte a cada unidade de tempo:

$$\dot{Q} = c_{p\text{ água}} \times \dot{m} \times (T_2 - T_1) \quad [Eq. 4]$$

- Condutividade Térmica da formação geológica, ou velocidade da condução da energia térmica no interior do material em que o furo do permutador de calor está instalado, expressa da seguinte forma: [12]

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi \times k \times H} \quad [Eq. 5]$$

- Difusividade Térmica do solo, indica como o calor se difunde através de um material: [37]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times c_p} \quad [Eq. 6]$$

- Resistência Térmica do furo, causada principalmente pela transferência térmica, isto é, pelo contacto entre o material utilizado para preencher o furo e o próprio furo. [4]

$$R_b = \frac{H}{\dot{Q}} \times \left[T_f(t) - \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \ln(t) - T_0 \right] - \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \right) \times \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \quad [\text{Eq. 7}]$$

- Número de Reynolds, número adimensional usado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície, e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso de um fluxo de água num tubo cilíndrico, para valores menores que 2.000 o fluxo será laminar, e para valores maiores que 4000 o fluxo será turbulento. Entre estes dois valores o fluxo é considerado como transitório. [38]

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Capítulo 5

Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do trabalho realizado quer de simulação energética, a fim de obter o resultado das cargas térmicas; da simulação geométrica de otimização realizada aos furos geotérmicos verticais; dos testes de resposta térmica realizados quer na ESTSetúbal quer na Quinta da Ombria, Loulé - Algarve. Estes resultados serão apresentados de forma compacta, sendo realizado um breve comentário, tendo em conta que no capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas acerca destes resultados.

5.1. Cargas Térmicas

A simulação energética realizada à área em estudo – espaços abrangidos pelo recurso a energia geotérmica, pretende verificar a coerência das bombas de calor geotérmicas instaladas; e as necessidades de aquecimento e arrefecimento da respetiva área.

DIMENSIONAMENTO

O objetivo deste dimensionamento é provar que as potências das duas bombas de calor estão corretas. Como anteriormente enunciado, a potência de aquecimento instalada é de 30 kW, pelo que, segundo a Tabela 5.1, é possível confirmar que a mesma foi bem dimensionada pois a necessidade de aquecimento fica pelos 26,7 kW.

Tabela 5.1 - Potência de aquecimento (Dimensionamento HAP).

Air System Name	Mult.	System Heating Coil Load (kW)
SistemaGSHP	1	26,7

Relativamente à potência de arrefecimento instalada de 24 kW, pela Tabela 5.2 é possível verificar que a mesma poderá esta subdimensionada, uma vez que a necessidade máxima de recurso à mesma é de 31,3 kW – dia mais quente do ano: 19:00 de julho, pelo que não é uma questão de todo alarmante.

Tabela 5.2 - Potência de arrefecimento (Dimensionamento HAP).

Air System Name	Mult.	System Cooling Coil Load (kW)
SistemaGSHP	1	31,3

Realizando um estudo ao dimensionamento dos ventiloconvectores – Tabela 5.3, é possível observar quais os parâmetros que têm mais influência relativamente às necessidades de energia útil, nomeadamente equipamentos elétricos com uma necessidade de consumo de 6869 W; a envolvente interior, com cerca de 4642 W de necessidade de consumo; a ocupação com uma necessidade de cerca de 4554 W; a cobertura com aproximadamente 2456 W; e os vãos envidraçados com cerca de 2809 W. Entre outros abaixo enunciados, estes parâmetros influenciam diretamente a necessidade de aquecimento ou arrefecimento de um determinado espaço. É de salientar que, no caso da envolvente interior, pelo facto de se ter considerado $b_{tr}=0.8$, este fator pode influenciar para uma situação de subdimensionamento.

Tabela 5.3 – Necessidades de energia útil – ganhos térmicos associados.

	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 32,1 °C / 21,3 °C			HEATING OA DB / WB 3,1 °C / 2,0 °C		
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	42 m²	2809	-	42 m²	-	-
Wall Transmission	73 m²	359	-	73 m²	1338	-
Roof Transmission	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Window Transmission	42 m²	1342	-	42 m²	4618	-
Skylight Transmission	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Door Loads	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Floor Transmission	231 m²	0	-	231 m²	640	-
Partitions	478 m²	4642	-	478 m²	11512	-
Ceiling	231 m²	2456	-	231 m²	6092	-
Overhead Lighting	1847 W	1776	-	0	0	-
Task Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Electric Equipment	7800 W	6869	-	0	0	-
People	79	4554	4748	0	0	0
Infiltration	-	1871	192	-	4453	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	26677	4940	-	28653	0
Zone Conditioning	-	25589	4940	-	27437	0
Plenum Wall Load	0%	0	-	0	0	-
Plenum Roof Load	0%	0	-	0	0	-
Plenum Lighting Load	0%	0	-	0	0	-
Exhaust Fan Load	0 L/s	0	-	0 L/s	0	-
Ventilation Load	0 L/s	0	0	0 L/s	0	0
Ventilation Fan Load	0 L/s	0	-	0 L/s	0	-
Space Fan Coil Fans	-	720	-	-	-720	-
Duct Heat Gain / Loss	0%	0	-	0%	0	-
>> Total System Loads	-	26309	4940	-	26717	0
Terminal Unit Cooling	-	26309	4984	-	0	0
Terminal Unit Heating	-	0	-	-	26717	-
>> Total Conditioning	-	26309	4984	-	26717	0

CONSUMO ENERGÉTICO (SIMULAÇÃO ENERGÉTICA)

Em seguida, são apresentados os resultados das cargas térmicas associadas à área em estudo. Este parâmetro associado às necessidades de aquecimento e arrefecimento mensal será utilizado posteriormente no programa EED, para realizar o estudo de otimização dos furos geotérmicos – Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados da simulação mensais da energia elétrica - espaço total climatizado.

Month	Terminal Cooling Coil Load (kWh)	Terminal Heating Coil Load (kWh)	Terminal Fan (kWh)	Lighting (kWh)	Electric Equipment (kWh)
January	0	2585	248	370	1135
February	12	1572	216	322	1001
March	37	540	227	338	1071
April	74	171	238	354	1090
May	679	95	238	354	1103
June	2267	0	227	338	1058
July	4463	0	248	370	1135
August	0	0	0	0	402
September	3141	0	238	354	1090
October	499	14	248	370	1135
November	60	395	216	322	1027
December	3	1930	248	370	1135
Total	11234	7303	2592	3862	12384

Pelo que, o mesmo resultado das cargas térmicas, poderá ser mais perceptível através da representação gráfica – Figura 5.1. Esta mostra que existe um ligeiro desequilíbrio energético ao longo do ano, uma vez que a carga energética necessária de verão é superior à carga de energia ao longo do inverno, sendo compensada por esta em 65%.

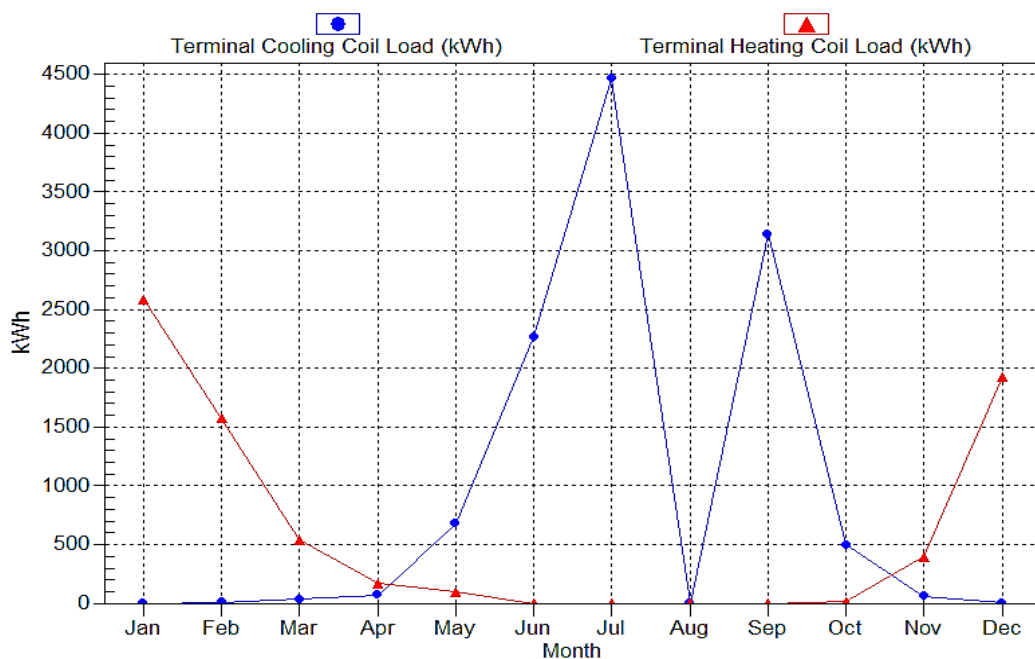


Figura 5.1 - Representação gráfica dos resultados das necessidades de aquecimento e arrefecimento mensais, conforme mostra a Tabela 5.4.

Já a Tabela 5.5 mostra para as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, qual o consumo elétrico das bombas de calor para as necessidades energéticas.

Tabela 5.5 – Consumo elétrico das bombas de calor para as necessidades energéticas.

Month	Cooling Coil Load (kWh)	Heating Coil Load (kWh)	Plant Cooling Load (kWh)	Plant Heating Load (kWh)	Chiller Cooling Output (kWh)	Chiller Heating Output (kWh)	Chiller Input – Cooling Mode (kWh)
January	0	2585	0	2611	0	2611	0
February	12	1572	12	1588	12	1586	2
March	37	540	37	545	37	545	7
April	74	171	75	173	75	173	14
May	679	95	686	96	686	96	122
June	2267	0	2290	0	2290	0	422
July	4463	0	4508	0	4503	0	859
August	0	0	0	0	0	0	0
September	3141	0	3172	0	3172	0	594
October	499	14	504	14	504	14	90
November	60	395	60	399	60	399	11
December	3	1930	3	1950	3	1950	1
Total	11234	7303	11346	7376	11342	7373	2122

Pelo que, o resultado relativo aos custos anuais associados ao consumo energético da área em estudo, associada ao sistema GSHP, e respetiva percentagem, encontram-se apresentados na Tabelas 5.6 e Figura 5.2, respetivamente. O custo unitário utilizado no estudo foi de 0,154 €/kWh. É perceptível que os componentes com maior influência sobre as cargas térmicas são os equipamentos elétricos, seguidos da iluminação - componentes que não pertencem ao sistema AVAC.

Tabela 5.6 - Custos anuais, espaço total climatizado.

Component	Edifício__EST_G SHP (€)
Air System Fans	533
Cooling	431
Heating	220
Pumps	0
Heat Rejection Fans	0
HVAC Sub-Total	1.185
Lights	794
Electric Equipment	2.571
Misc. Electric	0
Misc. Fuel Use	0
Non-HVAC Sub-Total	3.365
Grand Total	4.550

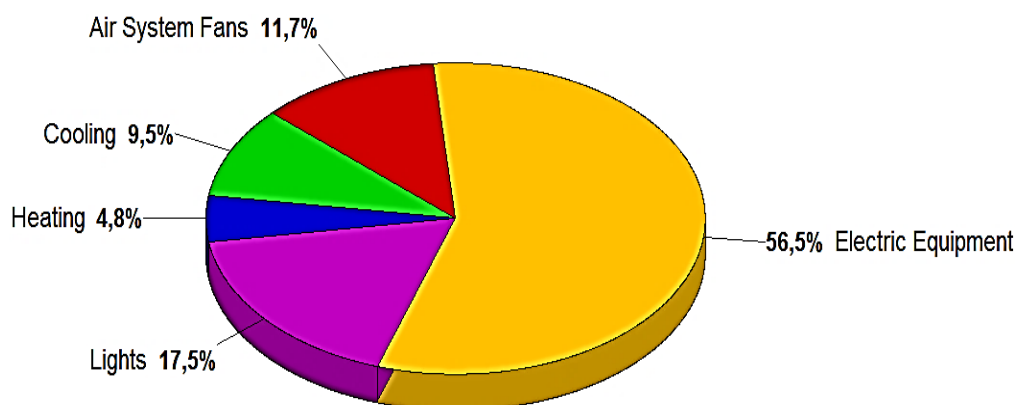


Figura 5.2 - Custos anuais, em percentagem de todo o espaço climatizado.

Sendo que as cargas anuais associadas aos custos acima apresentados, encontram-se explicitas nas Tabelas 5.7 e 5.8, pelo que é explícito que há maior necessidade de arrefecimento do que aquecimento, conforme se tinha concluído nos resultados apresentados no dimensionamento HAP.

Tabela 5.7 - Consumos energéticos anuais de arrefecimento e aquecimento.

Component	Load (kWh)	(kWh/m²)
Cooling Coil Loads	11.234	48,548
Heating Coil Loads	7.303	31,561
Grand Total	18.537	80,109

Tabela 5.8 - Consumo energético de todos os componentes.

Component	Site Energy (kWh)	Site Energy (kWh/m²)	Source Energy (kWh)	Source Energy (kWh/m²)
Air System Fans	2.592	11,201	6.480	28,002
Cooling	2.122	9,168	5.304	22,920
Heating	1.072	4,631	2.679	11,578
Pumps	0	0,000	0	0,000
Heat Rejection Fans	0	0,000	0	0,000
HVAC Sub-Total	5.785	25,000	14.463	62,501
Lights	3.862	16,688	9.654	41,720
Electric Equipment	12.383	53,516	30.959	133,789
Misc. Electric	0	0,000	0	0,000
Misc. Fuel Use	0	0,000	0	0,000
Non-HVAC Sub-Total	16.245	70,203	40.613	175,508
Grand Total	22.030	95,204	55.075	238,009

5.2. Otimização dos furos geotérmicos

A instalação como está instalada, teve um custo de 16.000€. No entanto, se a mesma tivesse sido otimizada usando os valores do TRT, como foi efetuado neste estudo, realizando a simulação do cálculo pela variável de profundidade do furo, mantendo os cinco furos, iria-se obter um custo de 15.348 €. Contudo, verifica-se que estão muito bem equilibrados os resultados obtidos, sendo que os parâmetros fazem variar pouco o resultado, o que significa que a instalação foi bem calculada.

A Figura 5.3 mostra o comportamento da temperatura do fluido ao longo do 25º ano, que permite verificar que nunca atinge a carga máxima de arrefecimento, contudo atinge a carga máxima de aquecimento, conforme mostra a representação gráfica.

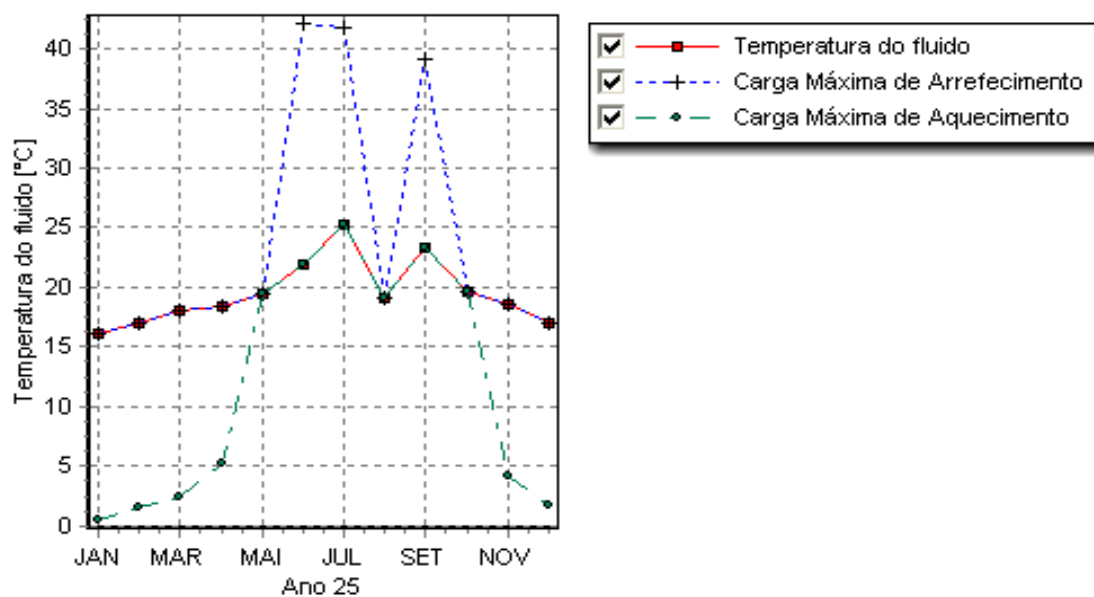


Figura 5.3 - Temperatura do fluido, ano 25.

É possível ainda, através da Figura 5.4, observar a oscilação/comportamento da temperatura anual máxima e mínima do fluido ao longo do período de 25 anos, relativamente ao fator de ponta mínimo e máximo instalados. Aqui, é possível observar que existe o fator de ponta cobre, com uma margem elevada, as necessidades quer de

aquecimento quer de arrefecimento. Assim, é possível concluir que a temperatura não sofre grandes alterações ao longo dos 25 anos, uma vez que o desequilíbrio ao longo do ano entre as estações de aquecimento e arrefecimento, não é demasiado elevado, não produzindo assim efeitos negativos.

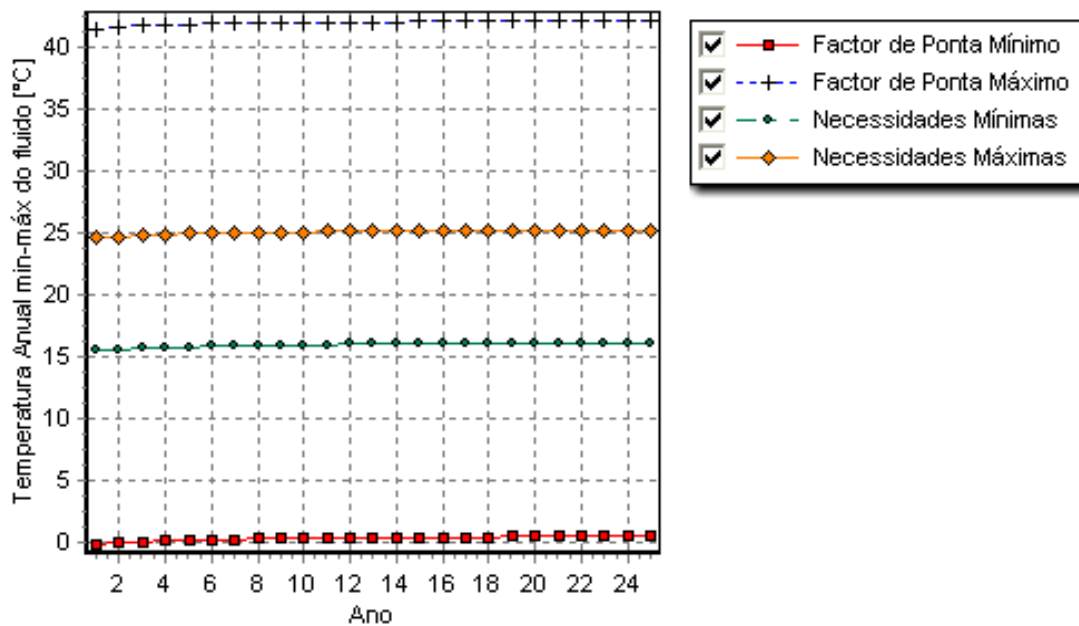


Figura 5.4 - Temperatura anual mínima e máxima de fluido, no período de 25 anos.

Pelo que, após otimização, obteve-se a condição mais favorável para a instalação em causa, tendo em conta o ponto ótimo entre o fator custo como o fator profundidade – Figura 5.5. O cálculo efetuado de otimização da estrutura de furos verticais, que se traduz na melhor disposição para os cinco furos, aproxima-se do já existente, sendo que após a simulação constata-se que se se tivesse realizado um TRT aquando a instalação dos furos, ter-se-ia poupado 16 metros no total, pelo que se conclui que não é relevante.

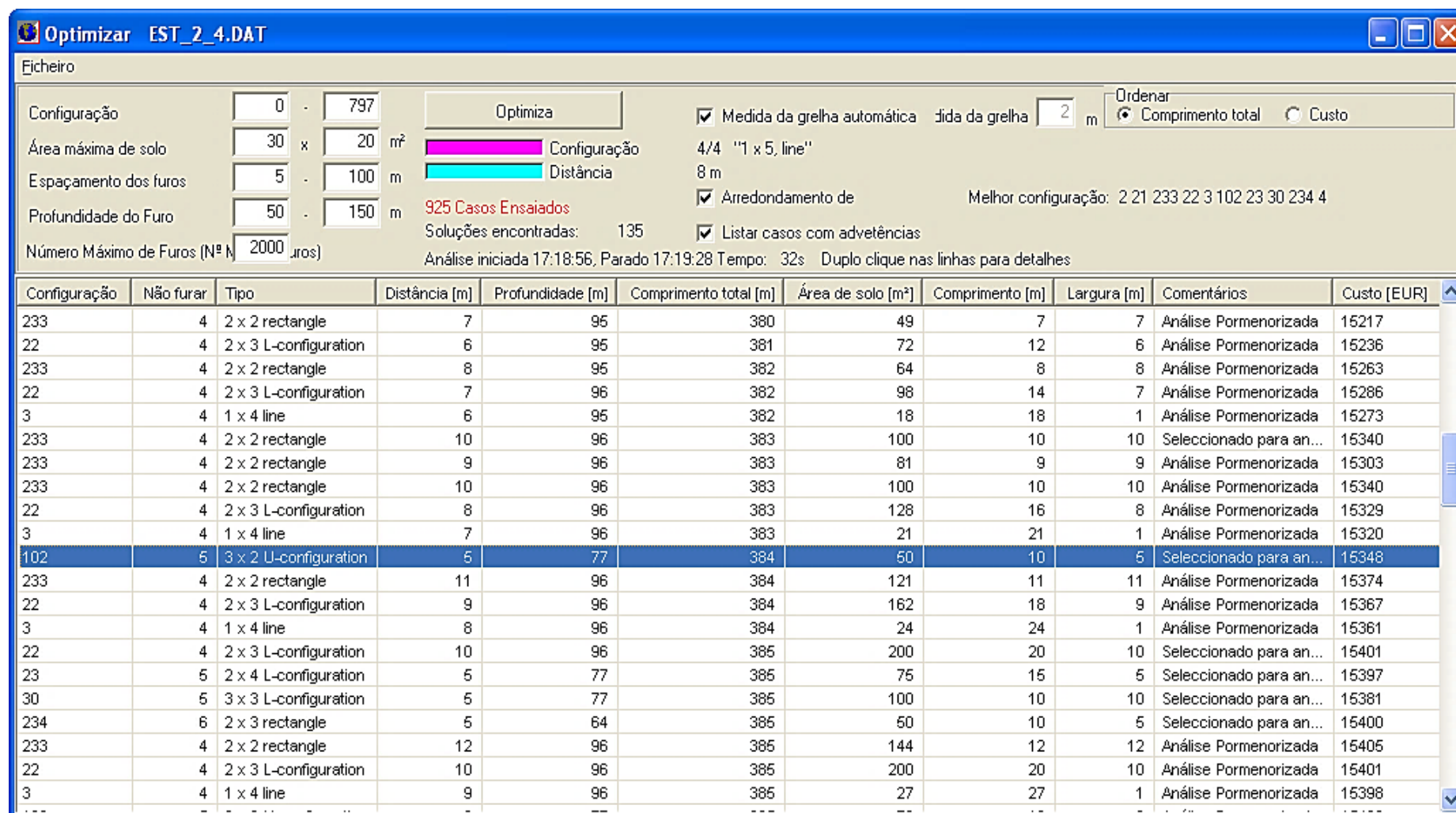


Figura 5.5 - Otimização da instalação dos furos geotérmicos verticais.

É possível constatar a conclusão anteriormente retirada de uma forma mais sucinta, através da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Comparação entre a instalação de furos geotérmicos verticais já existente; e a após simulação de TRT.

	Instalado 2009	Simulado após TRT (2015)
N.º furos	5	5
Geometria	3 x 2	3 x 2
Distância entre furos	5	5
Profundidade [m]	80 Total: 400	77 Total: 384
Condutividade Térmica [W/(m.K)]	2,6 (estimativa)	2,465 (efetiva – média TRT realizados)
Custo instalação (€)	16.000	15.348
Notas	-	Situação ideal: - Solução mais económica: Poupança ~ 650€ - Menos 16m instalados no total.

Desta forma, comprova-se que entre a simulação realizada aquando a instalação dos furos com uma condutividade estimada de 2,6 W/(m.K) com uma profundidade otimizada de 400 m; e a simulação após realização do TRT de condutividade 2,465 W/(m.K) e uma profundidade otimizada de 384 m, existe apenas uma diferença de 4% relativamente à profundidade entre ambas as simulações sendo que a condutividade estimada não influenciou muito o resultado pela sua proximidade ao valor efetivo, e portanto verifica-se semelhança entre ambas as simulações, o que se traduz numa boa estimativa, uma vez que a instalação foi realizada com convenientemente. Verifica-se também concordância do tipo de geometria a instalar – Figura 5.6.

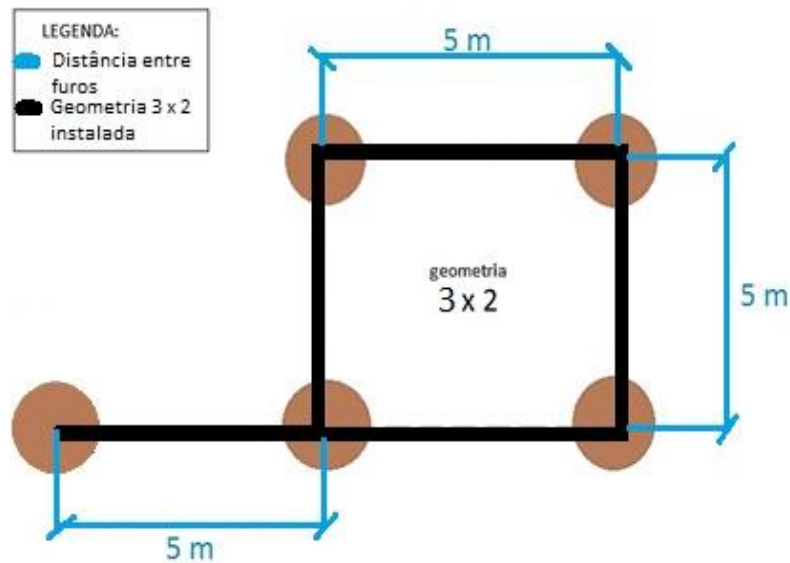


Figura 5.6 - Representação da configuração instalada na ESTSetúbal (Geometria: 3 x 2).

5.3. Teste de Resposta Térmica

5.3.1. Teste em Setúbal

Em todos os casos, antes de realizar o TRT, foram realizadas medições da temperatura do solo não perturbada. Isto é, foi efetuado a verificação do valor da temperatura do solo através da monitorização das temperaturas fluido que sai do permutador de calor no arranque da bomba de circulação, altura em que o fluido mantém o equilíbrio térmico com o solo circundante. Desta forma, a temperatura do fluido que sai do permutador de calor fornece uma estimativa precisa da temperatura do solo imperturbado. Para os testes relatados acima, as medições de temperatura do solo não perturbadas estiveram compreendidas entre 19,5 e 20,2 °C.

O passo seguinte foi a avaliar os testes de resposta térmica para obter uma estimativa da condutividade térmica do solo. Ao simular desenvolvimento de temperaturas do solo depois de um teste de resposta térmica, uma estimativa da condutividade do solo é requerida pelo modelo matemático apresentado anteriormente. O solo apresenta um valor

médio para todos os testes relativamente elevado da condutividade térmica de 2,5 W/(m·K). A temperatura média do fluido para os diferentes testes, o valor da temperatura do fluido à entrada do furo situa-se entre 36,2 °C e 42,0 °C, e à saída do furo entre 32,9 °C e 37,8 °C. Quanto à potência térmica, esta variou nos diferentes testes entre 4,2 kW e 6,7kW. Relativamente ao caudal de água, esta variou entre os 0,3 kg/s e 0,4 kg/s.

Os principais resultados obtidos encontram-se apresentados, de forma sucinta, na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Comparação entre os principais resultados obtidos quer Duplo U, quer Coaxial (Setúbal).

		Duplo U				Coaxial
Parâmetro	Sigla	N.º 1	N.º 2		N.º 3	N.º 1
		1º Teste	1º Teste	2º Teste	1º Teste	1º Teste
Potência [W]	Q	6677,449	4446,866	6402,118	6337,960	4193,043
Caudal [l/s]	q	0,346	0,354	0,360	0,350	0,300
Altura	H	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
Potência por unidade de comp. [W/m]	-	83,5	55,6	80,0	79,2	52,4
Inclinação temperatura vs logaritmo tempo ¹	k	2,516	1,865	2,766	2,156	1,652
Condutibilidade Térmica [W/(m.K)]	λ	2,640	2,372	2,303	2,924	2,524
Temperatura Solo [°C]	T ₀	19,770	19,770	19,550	19,770	20,21
Difusividade térmica solo [m/s ²]	α	10E-07	9,1E-07	8,87E-07	10,12E-07	9,71E-07
T _{in} [°C]	T ₂	40,210	34,210	41,980	39,980	36,210
T _{out} [°C]	T ₁	35,540	31,990	37,760	35,320	32,870
T _{fluido} [°C]	T _f	37,88	33,10	39,87	37,65	34,54
Resistência Térmica [(m.K)/W]	R _b	0,074	0,076	0,094	0,093	0,125
Número de Reynolds	R _e	10264	10511	10697	10388	8903
Período funcionamento	-	8/09/14–11/09/14	18/09/14–22/09/14	28/10/14–31/10/14	26/09/14–30/09/14	12/9/14–16/9/14
Tempo funcionamento [horas]	Horas ²	-	6,452	7,332	7,588	6,716
	Tempo total teste ³	-	69	89	70	90

1 Valor gerado através da equação linear da reta, após obter as curvas de crescimento da temperatura do fluido ao longo do tempo.

2 Após arranque da bomba de circulação e posterior estabilização do sistema.

3 Tempo total da execução do teste, em horas.

Para avaliar se o escoamento no interior do permutador se encontrava em regime turbulento foi calculado o número de Reynolds de acordo com a Eq. [8]. Para que se considere regime turbulento o valor do número de Reynolds deverá ser superior a 4000. Neste caso, apesar do escoamento ainda se encontrar dentro do regime transitório, devido às características do escoamento, ele passa normalmente para turbulento, mantendo-se assim durante todo o funcionamento do sistema. Verifica-se na Tabela 5.10 que o escoamento encontra-se em regime turbulento para os cinco testes.

Obteve-se as curvas das temperaturas do fluido, à entrada do permutador (T_1), ao longo do tempo, a fim de gerar a equação da reta linear relativamente à evolução logarítmica do tempo, que fornece os valores do parâmetro de inclinação temperatura vs logaritmo tempo (k), respetivo a cada permutador de calor – Figura 5.7 – 5.11; Tabela 5.10.

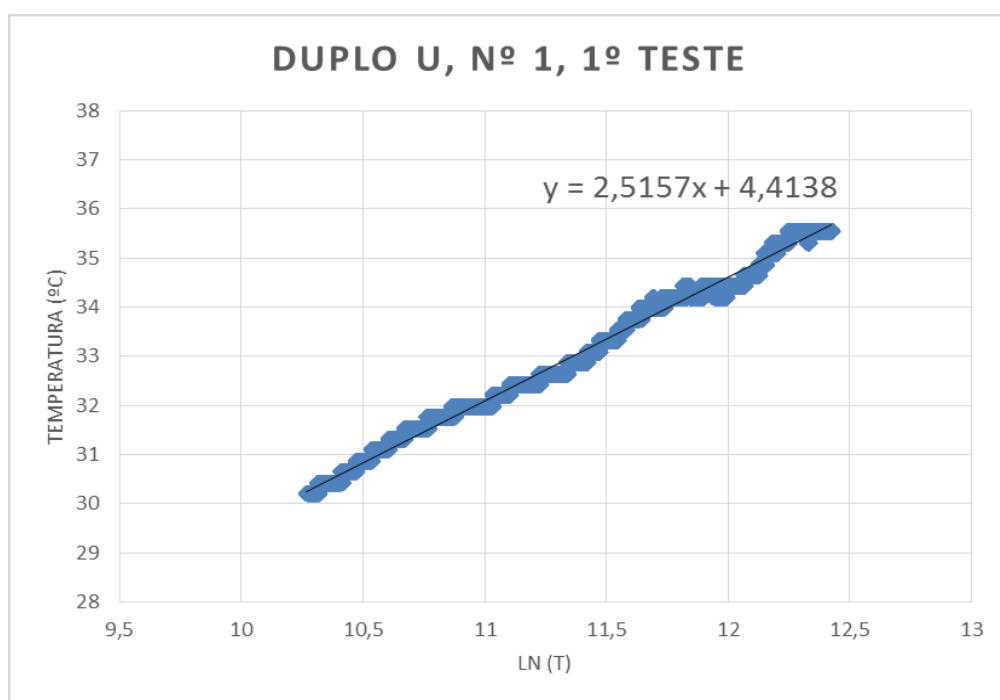


Figura 5.7 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 1, 1º teste).

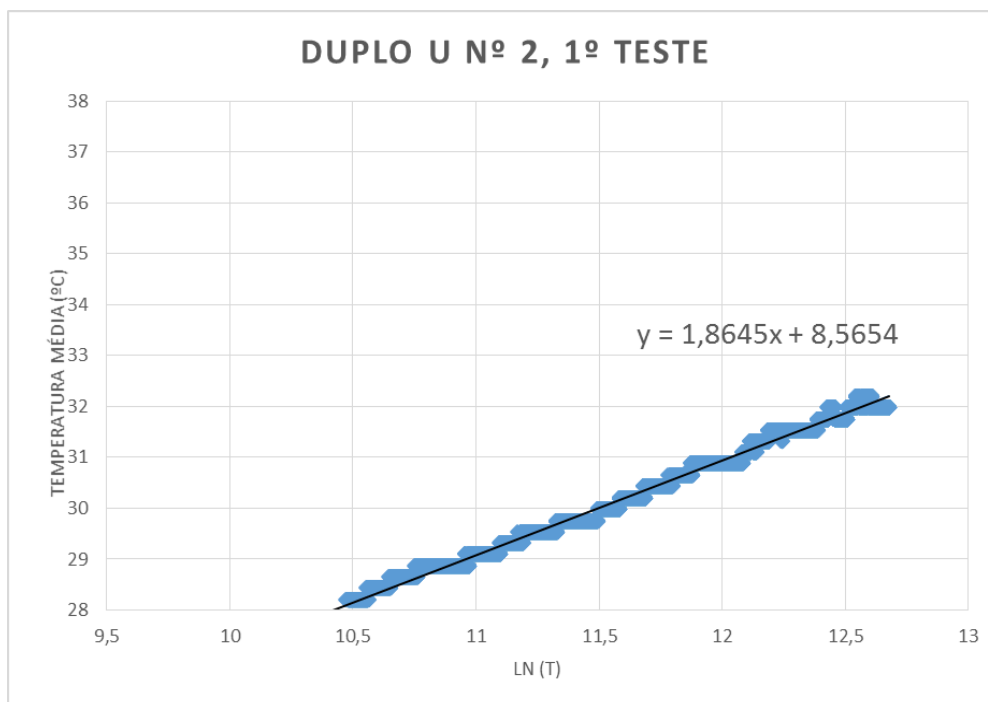


Figura 5.8 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 2, 1º teste).

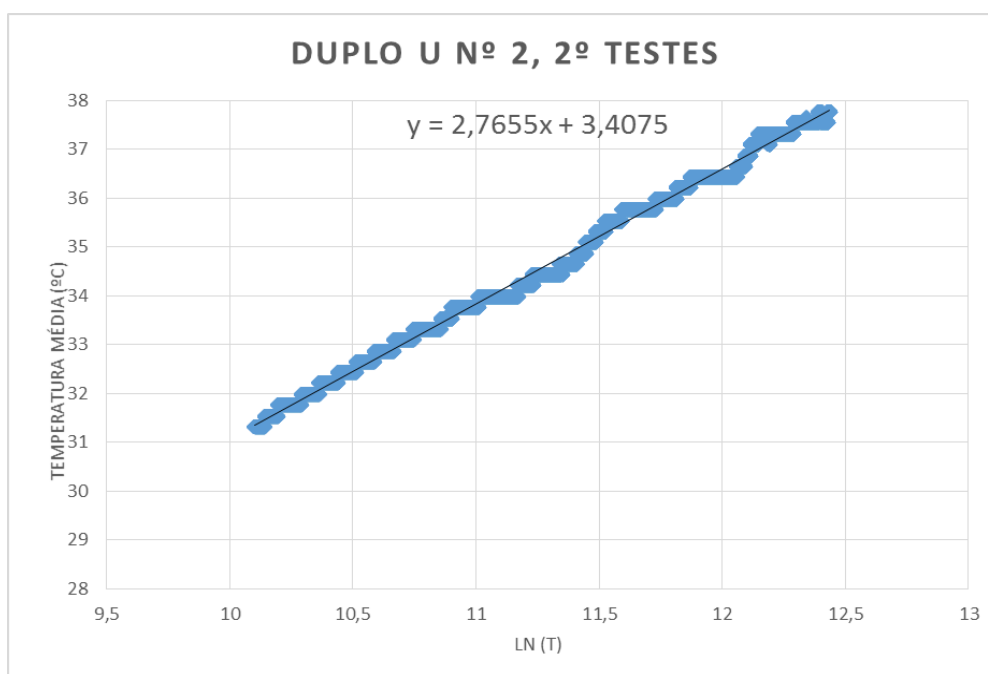


Figura 5.9 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 2, 2º teste).

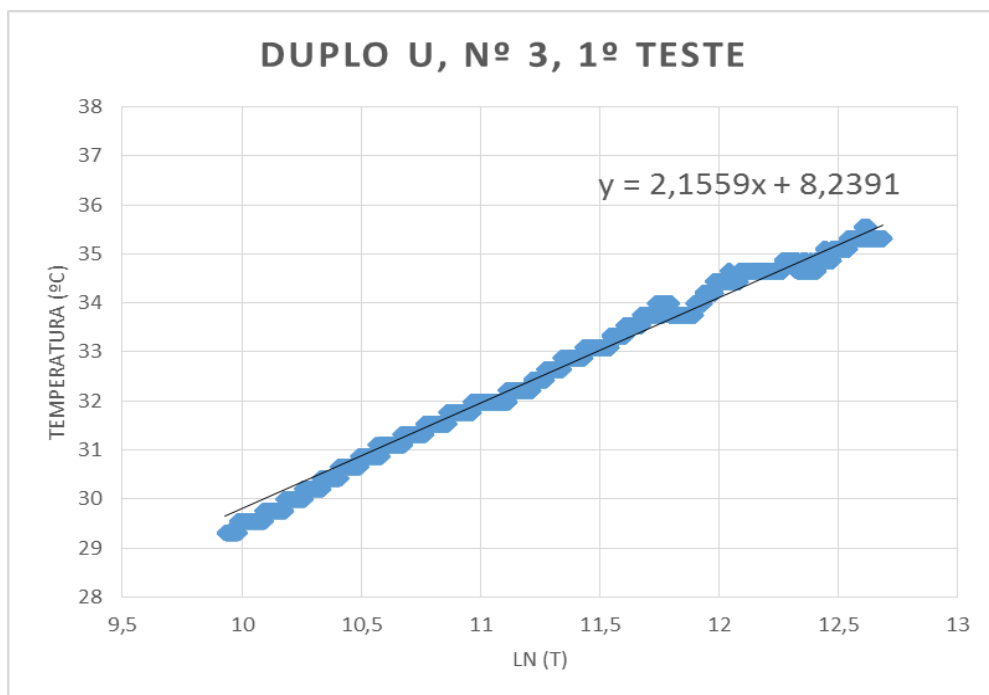


Figura 5.10 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Duplo U n.º 3, 1º teste).

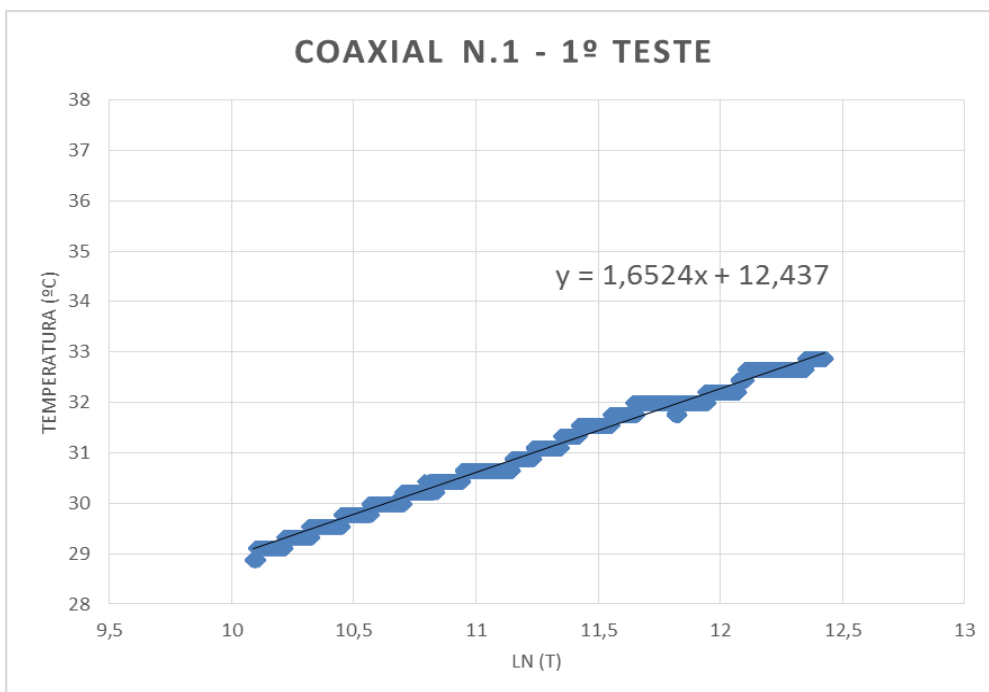


Figura 5.11- Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (Cx Simples n.º 1, 1º teste).

Com o valor de inclinação temperatura vs logaritmo tempo que corresponde à inclinação da reta, introduzindo na [Eq. 5] obtém-se o valor da condutividade térmica do solo (λ) para cada ensaio.

Posteriormente, foi possível estudar a coerência entre os valores da temperatura do fluido calculada através da média aritmética – [Eq.3], e a média das temperaturas T_1 e T_2 medidas – Figuras 5.12 – 5.16.

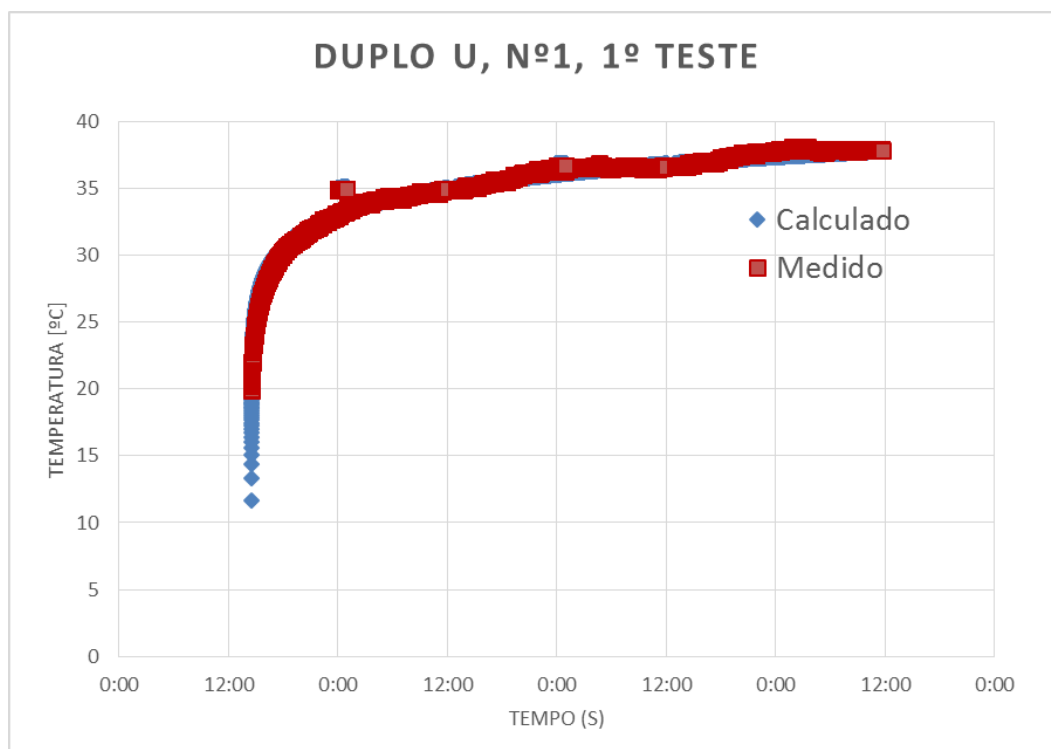


Figura 5.12 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 1, 1.º teste).

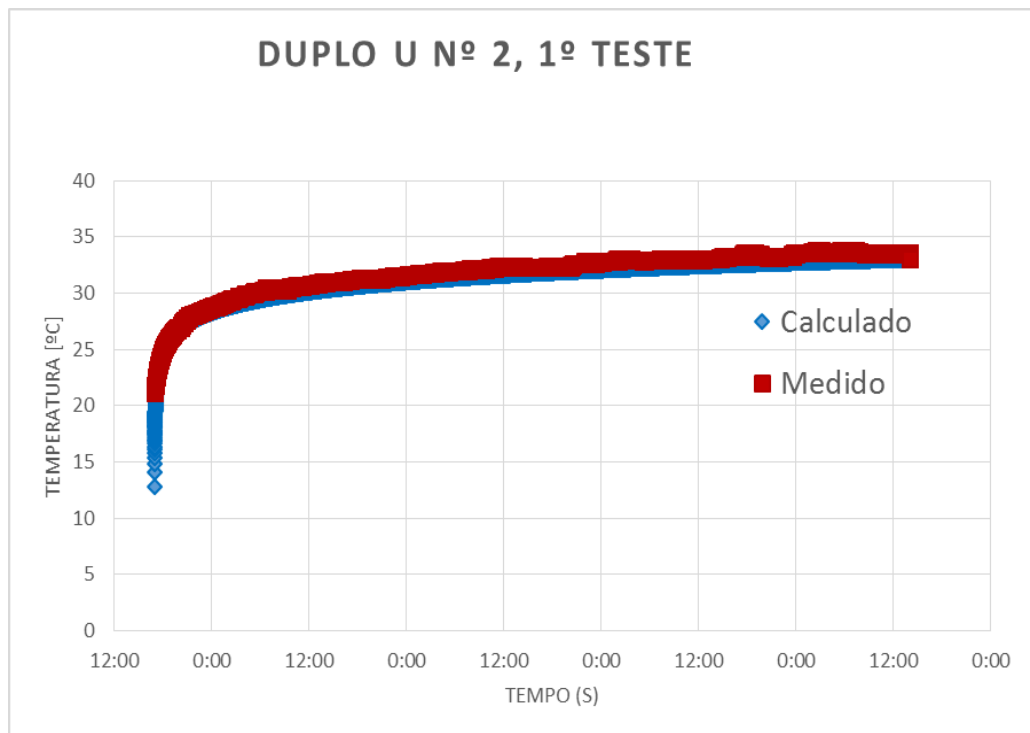


Figura 5.13 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 2, 1º teste).

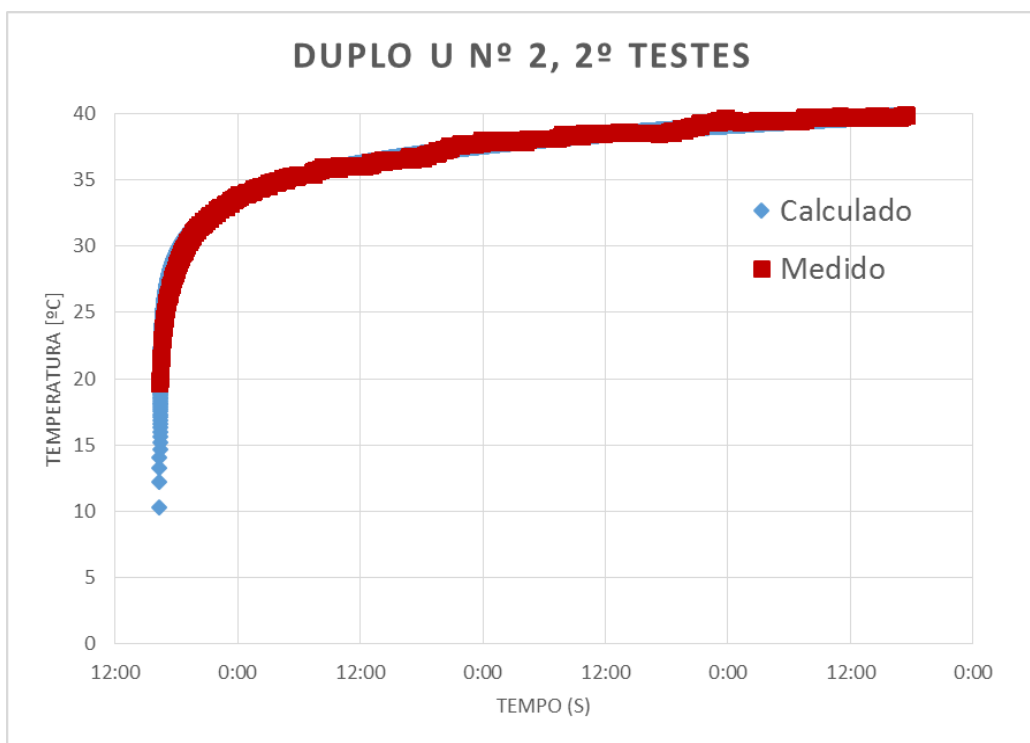


Figura 5.14 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 3, 1º teste).

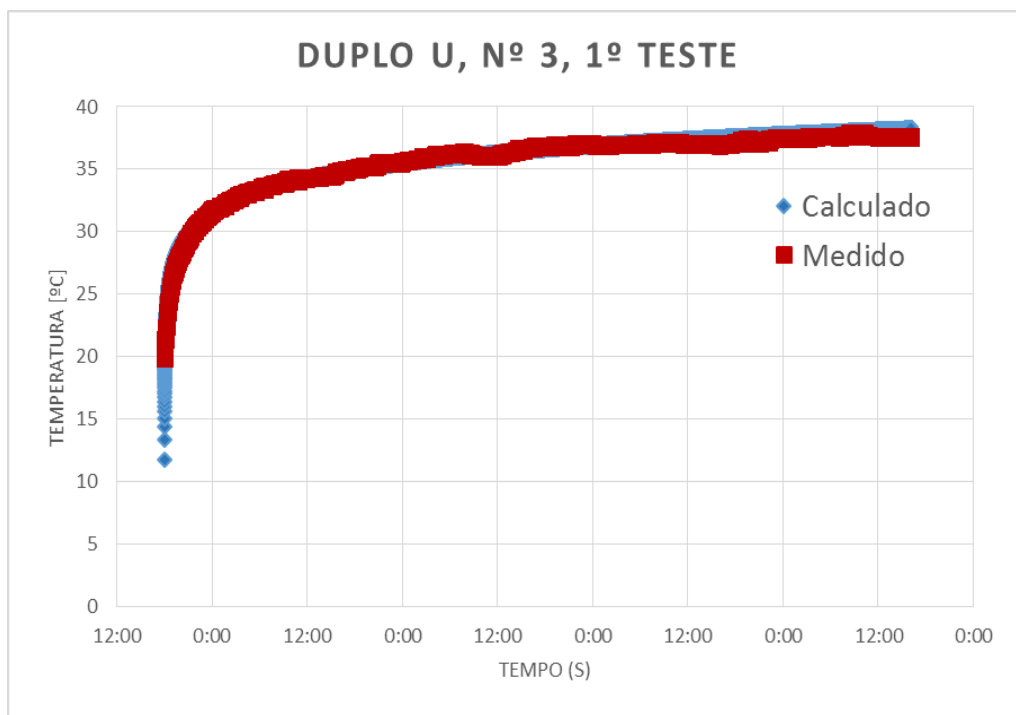


Figura 5.15 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 2, 2º teste).

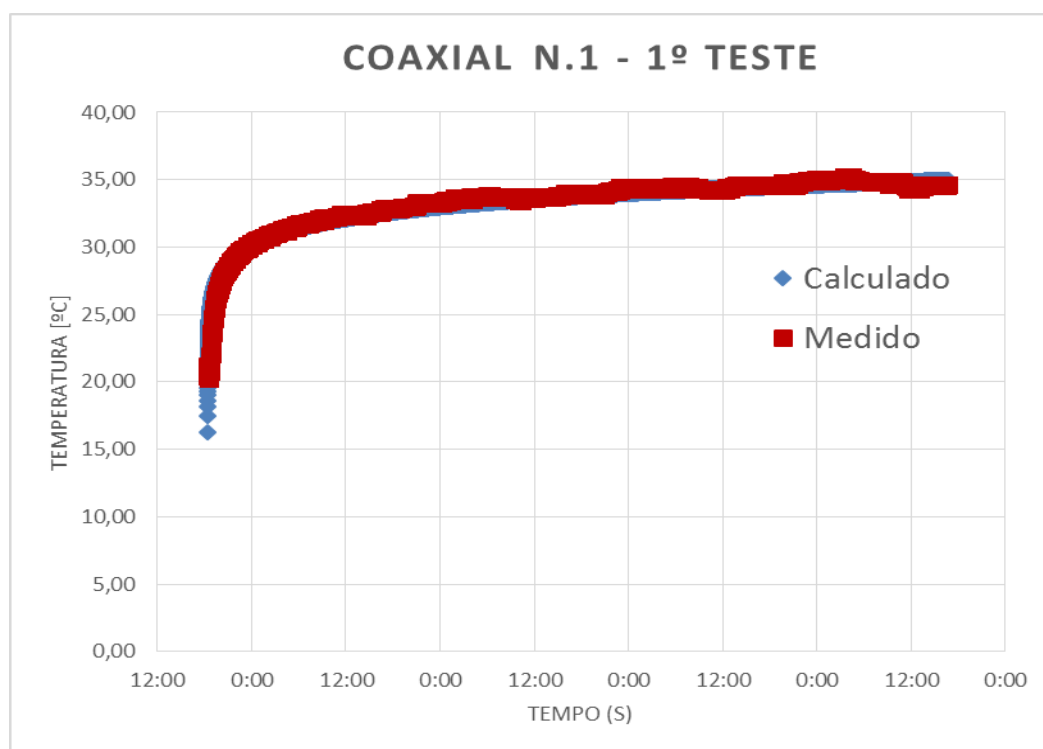


Figura 5.16 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (Duplo U n.º 1, 1º teste).

Verifica-se uma ótima concordância entre os valores de temperatura medidos e calculados.

Na Tabela 5.10, apresentam-se também os valores das resistências térmicas dos furos, calculados de acordo com a [Eq.7]. Os valores variaram entre 0,078 (m.K)/W e 0,096 (m.K)/W para os permutadores do tipo Duplo U. O permutador coaxial apresentam um valor ligeiramente superior 0,122 (m.K)/W, de acordo com o que era esperado.

Conclui-se que o Duplo U apresenta um melhor desempenho energético que o permutador Coaxial.

5.3.2. *Teste no Algarve*

No início de cada TRT, antes de ligar a fonte de calor, foram realizadas medições da temperatura do solo não perturbada. Isto é, foi efetuado a verificação do valor da temperatura do solo através da monitorização das temperaturas fluido que sai do permutador de calor no arranque da bomba de circulação, altura em que o fluido mantém o equilíbrio térmico com o solo circundante. Desta forma, a temperatura do fluido que sai do permutador de calor fornece uma estimativa precisa da temperatura do solo imperturbado.

Para os testes relatados acima, as medições de temperatura do solo não perturbadas estiveram compreendidas entre 18,4 e 19,6 °C. A diferença de 1,2 °C poderá ter a ver com a existência de fluxo de água no subsolo, correspondente à zona de menor temperatura.

O passo seguinte foi a avaliar os testes de resposta térmica para obter uma estimativa da condutividade térmica do solo e da resistência térmica correspondente. Ao simular a evolução de temperaturas do solo depois de um teste de resposta térmica, uma estimativa da condutividade do solo é requerida pelo modelo matemático apresentado anteriormente. O solo apresenta um valor médio da condutividade térmica para os três furos testados de 2,45 W/(m.K), variando entre 1,91 e 3,10 W / (m · K).

Os principais resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Representação sucinta dos principais resultados obtidos aos TRT befetuos a três permutadores de calor Duplo U (Algarve).

		Duplo U		
Parâmetro	Sigla	TRT 1 1º Teste	TRT 2 2º Teste	TRT 3 3º Teste
Potência [W]	Q	8904	12026	8488
Caudal [l/s]	q	0,430	0,250	0,262
Altura [m]	H	130	149	150
Potência por unidade comp. [W/m]	-	68,5	80,7	56,6
Inclinação temperatura vs logaritmo tempo ¹	k	2,339	2,073	2,336
Condutibilidade Térmica [W/(m.K)]	λ	2,331	3,098	1,914
Temperatura Solo [°C]	T ₀	19,55	18,4	18,5
Difusividade térmica solo [m/s ²]	α	9 x 10 ⁻⁷	12 x 10 ⁻⁷	7 x 10 ⁻⁷
T _{in} [°C]	T ₂ / T ₃	37,66	36,53	39,53
T _{out} [°C]	T ₁	32,75	25,05	31,79
T _{fluido} [°C]	T _f	35,21	30,79	36,66
Resistência Térmica [(m.K)/W]	R _b	0,076	0,133	0,188
Número de Reynolds	R _e	12783	7429	7772
Período funcionamento	-	9/07/15 – 12/07/15	27/07/15- 30/07/15	24/07/15- 27/07/15
Tempo funcionamento [horas]	Horas ²	-	7,7	5,9
	Tempo total teste ₃	-	60,6	16,8
1		Valor gerado através da equação linear da reta, após obter as curvas de crescimento da temperatura do fluido ao longo do tempo.		
2		Após arranque da bomba de circulação e posterior estabilização do sistema.		
3		Tempo total da execução do teste, em horas.		

Para avaliar se o escoamento no interior do permutador se encontrava em regime turbulento foi calculado o número de Reynolds de acordo com a Eq. [8]. Para que se considere regime turbulento o valor do número de Reynolds deverá ser superior a 4000. Neste caso, apesar do escoamento ainda se encontrar dentro do regime transitório (2300 – 10000), devido às características do escoamento, ele passa normalmente para turbulento, mantendo-se assim durante todo o funcionamento do sistema. Verifica-se na Tabela 5.11

que o escoamento encontra-se em regime turbulento para os três testes.

As Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram a evolução da temperatura do fluido, à saída do permutador, para os três testes, a fim de gerar a equação da reta linear – [Eq. 3], relativamente à evolução logarítmica do tempo, que fornece os valores do parâmetro de inclinação temperatura vs logaritmo tempo (k), respetivo a cada permutador de calor.

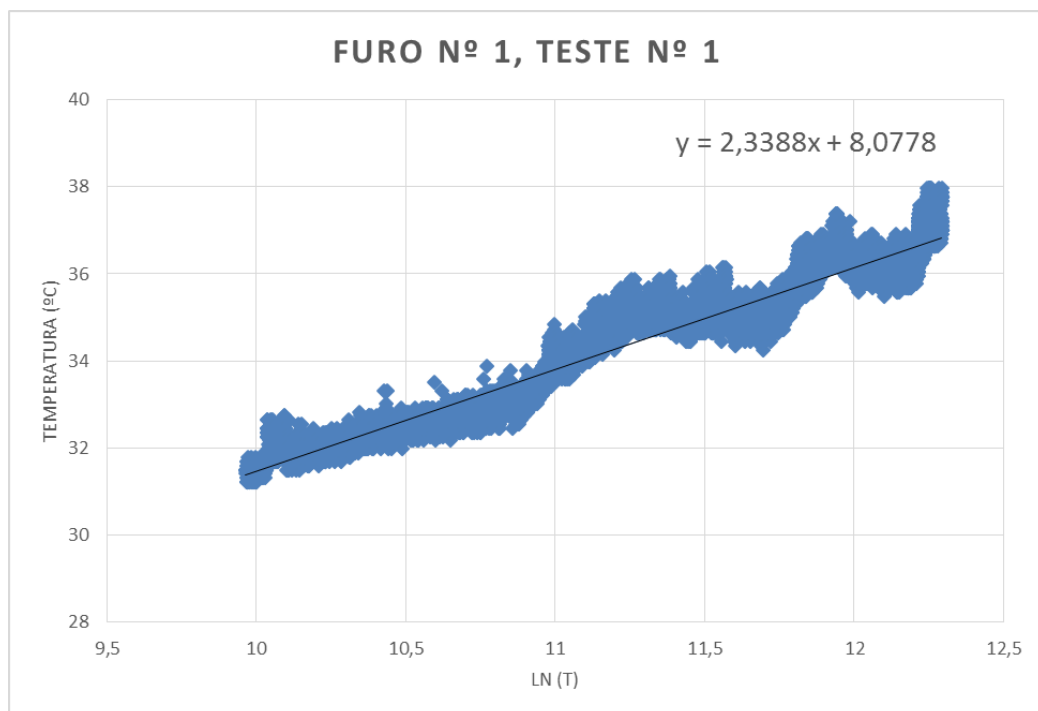


Figura 5.17 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 1, teste nº 1).

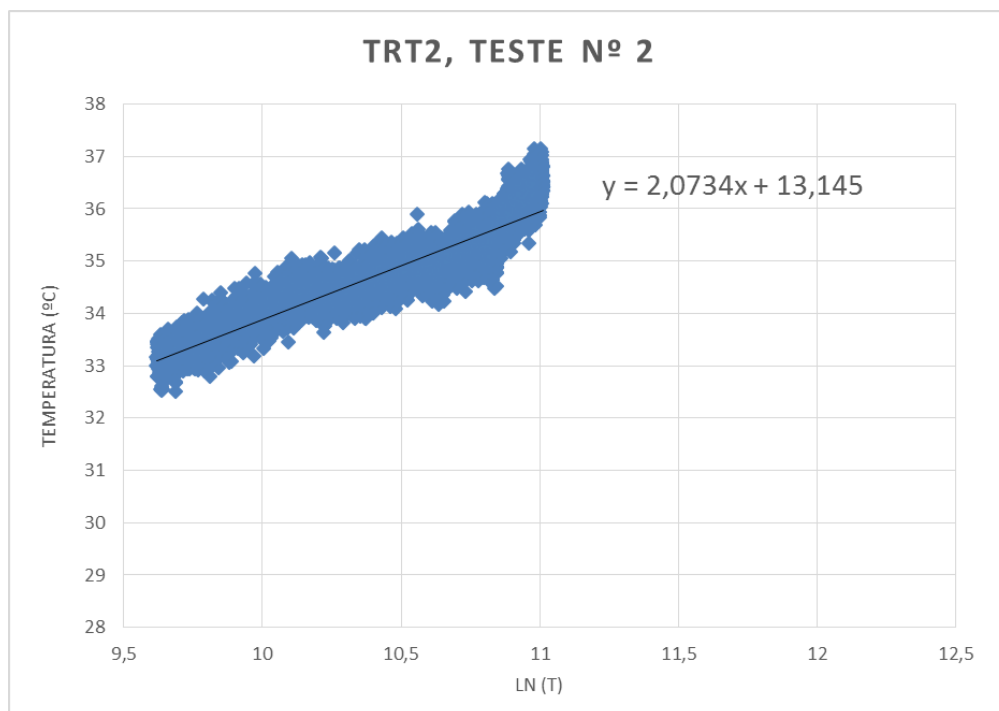


Figura 5.18 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 2, teste nº 2).

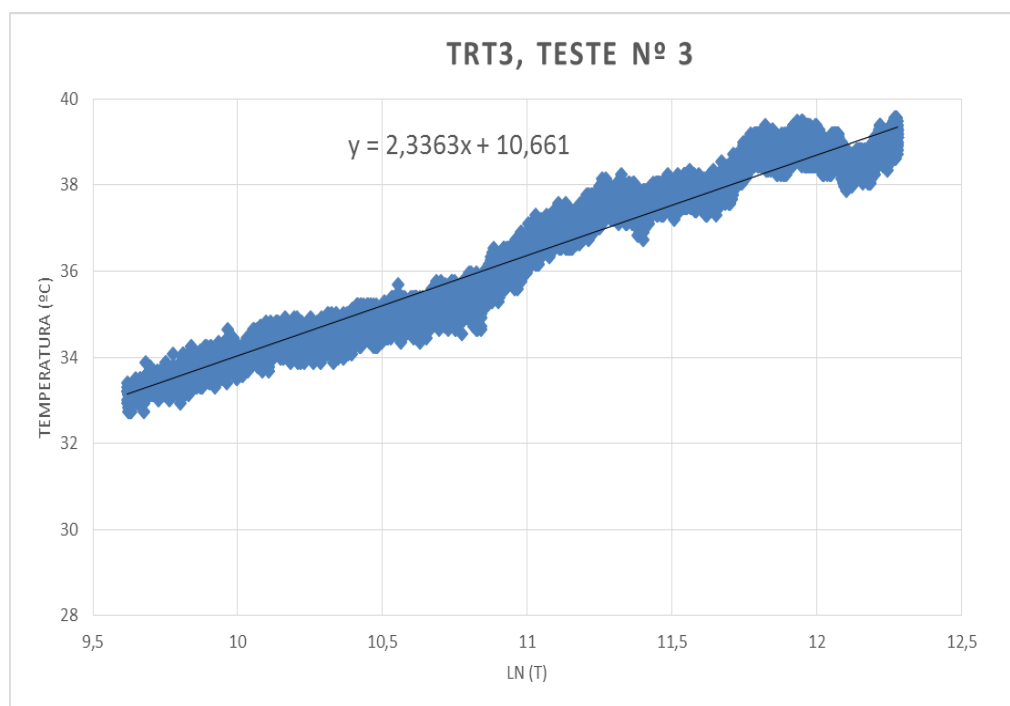


Figura 5.19 - Curva de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação temperatura vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta (TRT 3, teste nº 3).

Com o valor de inclinação temperatura vs logaritmo tempo que corresponde à inclinação da reta, introduzindo na [Eq. 5] obtém-se o valor da condutividade térmica do solo (λ) para cada ensaio.

Posteriormente, foi possível estudar a coerência entre os valores da temperatura do fluido, calculados através da média aritmética – [Eq. 3], e a média das temperaturas entre a entrada e a saída do permutador, medidas, ao longo do tempo. Estas comparações encontram-se representadas nas figuras seguintes:

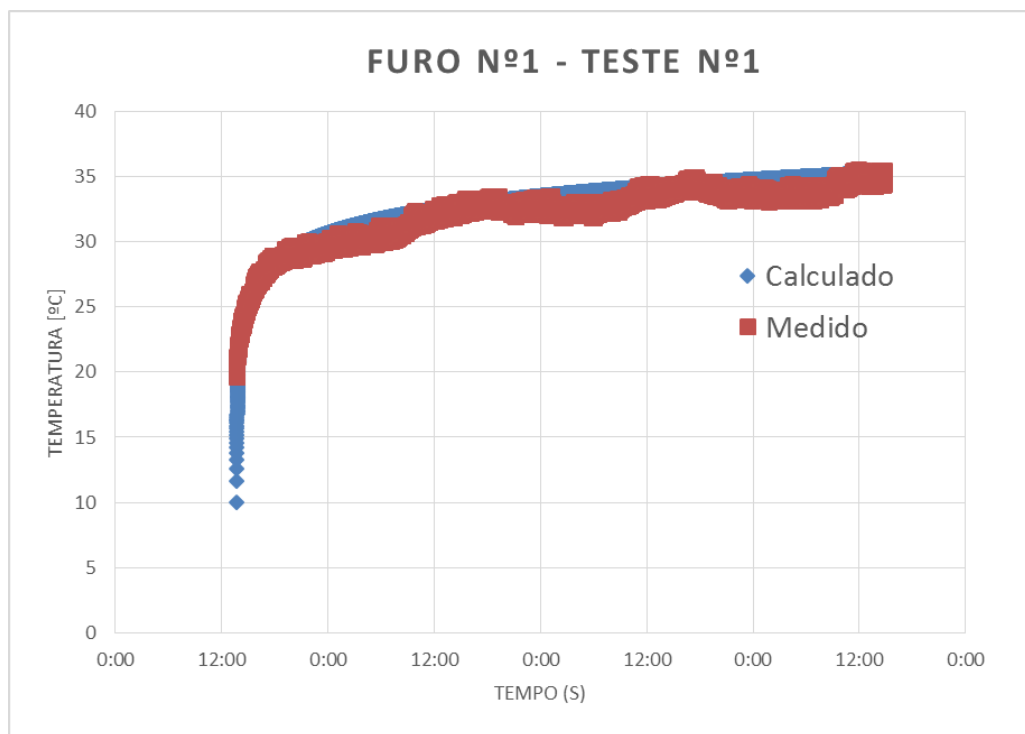


Figura 5.20 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT1, Teste nº 1).

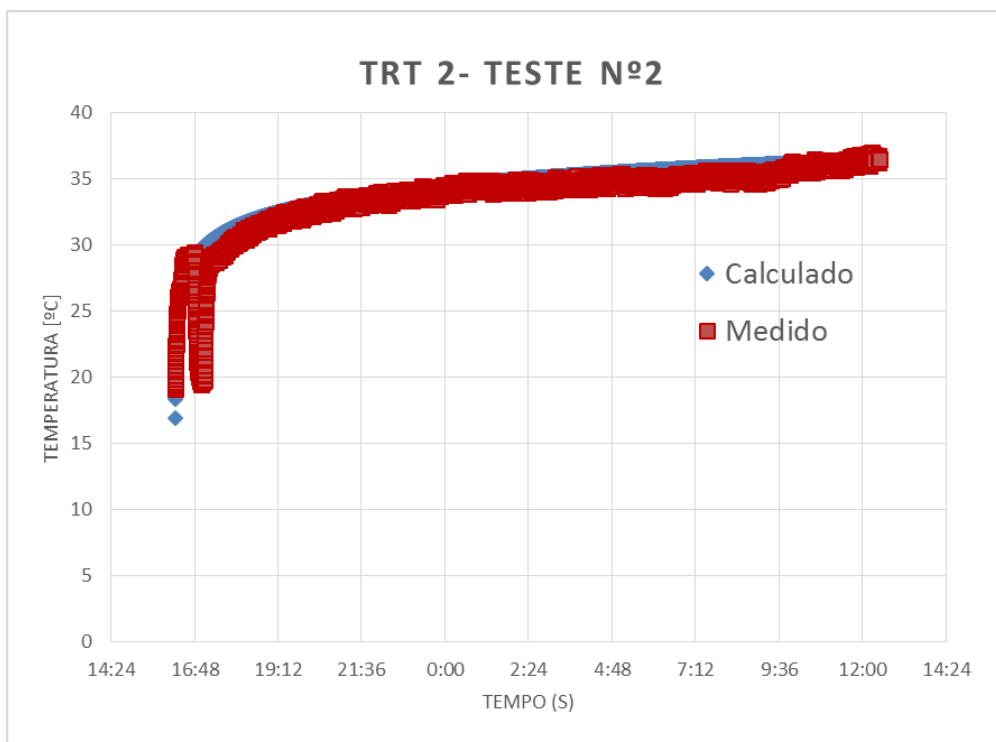


Figura 5.21 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT2, Teste nº 2).

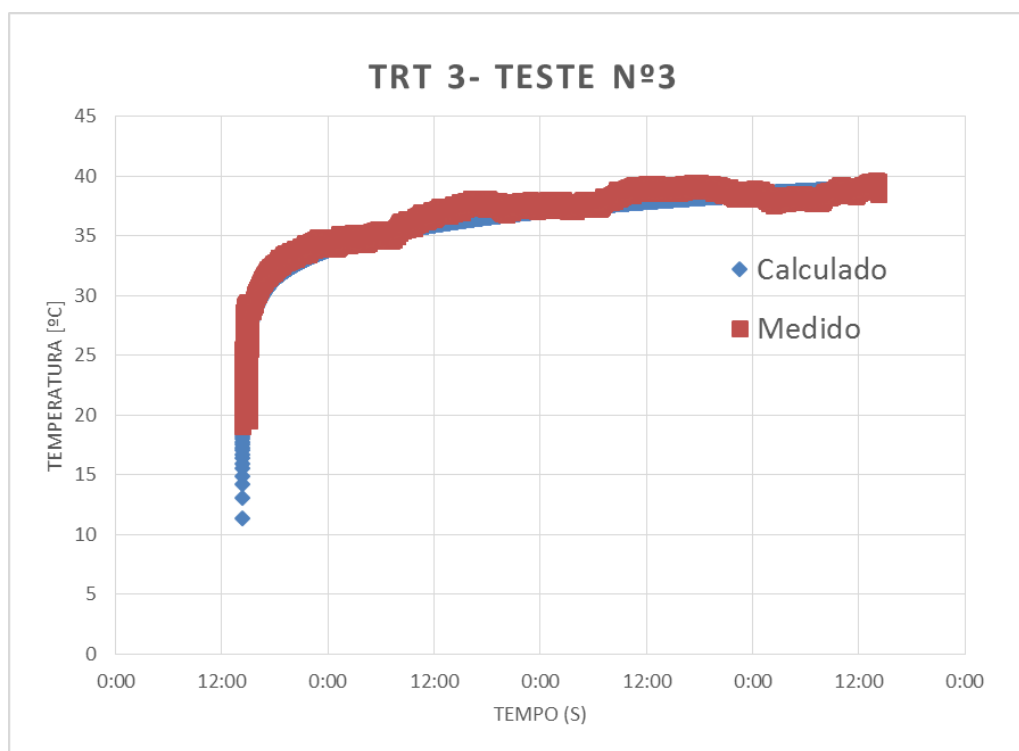


Figura 5.22 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas do fluido (TRT3, Teste nº 3).

Analisando as figuras verifica-se uma boa concordância entre os valores medidos da temperatura média entre a entrada e saída do permutador e a temperatura calculada utilizando os valores obtidos pela metodologia apresentada. Esta concordância mostra confiança nos valores obtidos.

As figuras seguintes mostram a evolução da potência injetada ao longo do tempo para cada um dos ensaios.

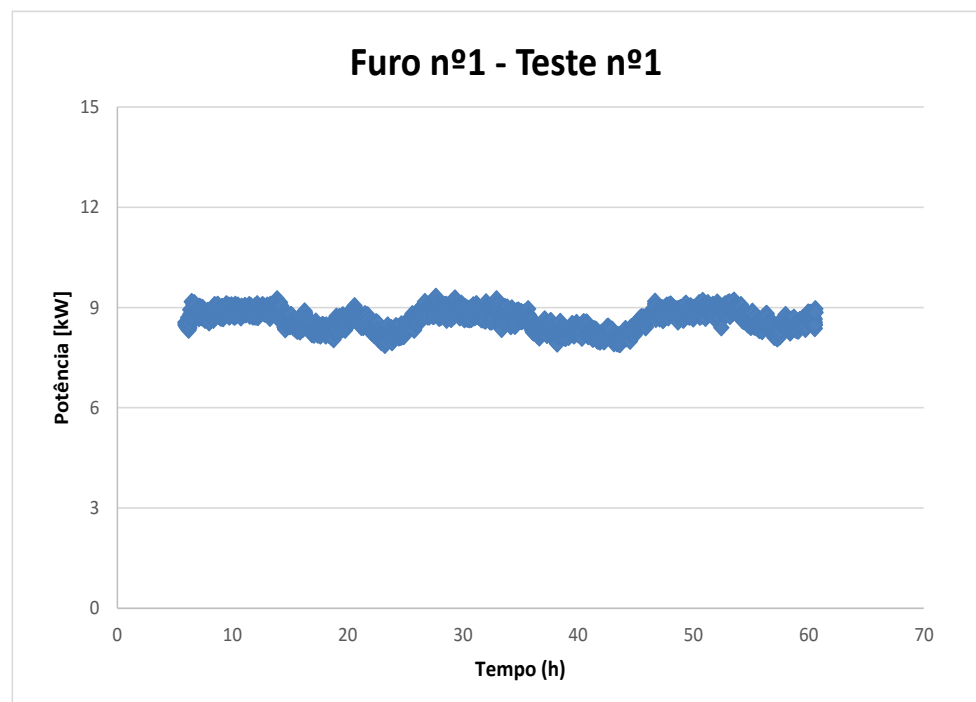


Figura 5.23 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo (TRT1, Teste nº 1).

Com apresentado na tabela o valor da potência injetada, considerada no cálculo foi de 8,8 kW, existindo uma variação de cerca de $\pm 8\%$ em torno do seu valor médio, considerando-se esta variação aceitável.

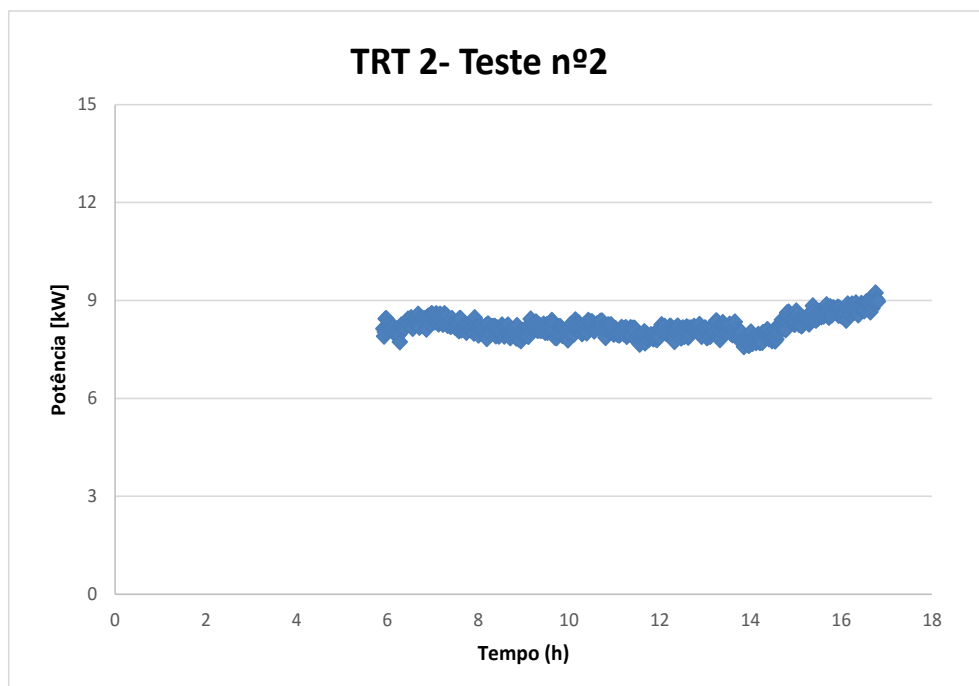


Figura 5.24 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo (TRT2, Teste nº 2).

Com apresentado na tabela o valor da potência injetada, considerada no cálculo foi de 8,5 kW, existindo uma variação de cerca de $\pm 10\%$ em torno do seu valor médio, considerando-se esta variação aceitável.

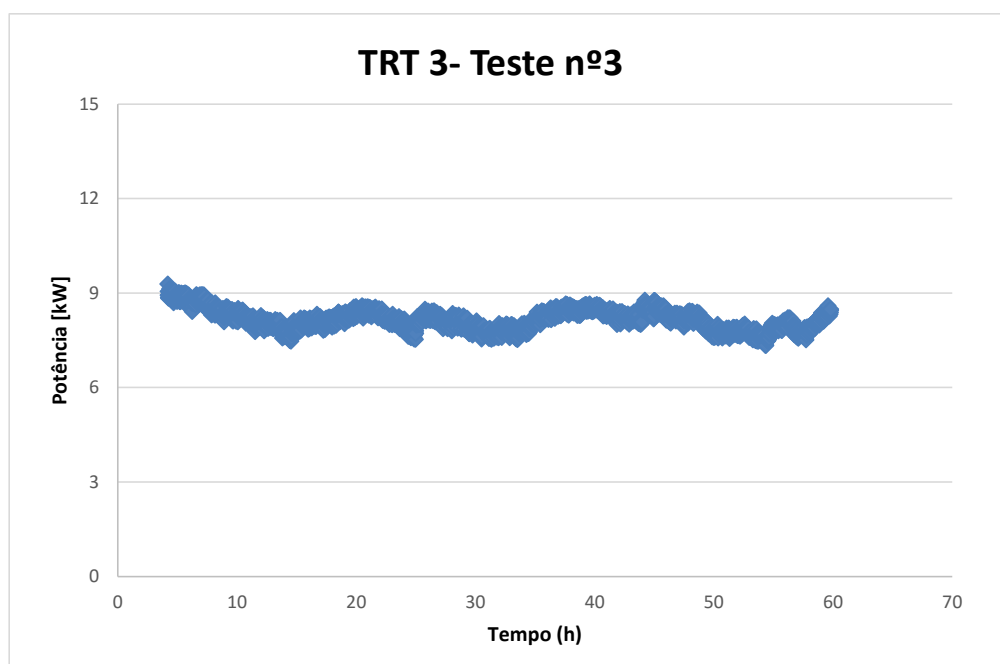


Figura 5.25 - Evolução da potência injetada ao longo do tempo (TRT3, Teste nº 3).

Como apresentado na tabela o valor da potência injetada, considerada no cálculo foi de 8,5 kW, existindo uma variação de cerca de $\pm 9\%$ em torno do seu valor médio, considerando-se esta variação aceitável.

Capítulo 6

Conclusões

A utilização de bombas de calor geotérmicas é uma alternativa viável na climatização de edifícios permitindo a redução do consumo de energia, das emissões de CO₂ e de custos de exploração dos edifícios. Com o desenvolvimento tecnológico e de mercado, as GSHP estão a tornar-se cada vez mais competitivas, pelo que em Portugal existem um quadro de oportunidades para a sua implementação. Existe, no entanto, a necessidade de se efetuarem estudos adequados de implementação para aproveitamento do seu potencial de forma eficaz (um mau estudo pode tornar um potencial ótima solução na pior de todas).

No âmbito da tese foi desenvolvido um equipamento de teste de resposta para os furos de geotermia. Foram realizados os testes de calibração, onde houve a necessidade de serem feitos vários ajustes. Os testes de calibração foram feitos no laboratório de termodinâmica aplicada da ESTSetúbal com os equipamentos que existiam disponíveis no laboratório. Os testes serviram também para corrigir algumas anomalias que foram sendo identificadas e, no final o TRT foi devidamente calibrado.

Num projeto de instalação de bombas de calor geotérmicas, o ideal é realizar a simulação de furos geotérmicos com valores teóricos calculados através de modelos e, posteriormente validar os parâmetros com os valores obtidos através dos Testes de Resposta Térmica (TRT), a fim de obter uma estimativa rigorosa do dimensionamento dos furos e consequência do funcionamento da instalação na evolução da temperatura do solo ao fim de 25 anos (duração prevista da instalação – período de simulação considerado).

Relativamente ao estudo da simulação aos furos verticais geotérmicos realizado, é pertinente referir que esta foi desenvolvida recorrendo ao programa EED fazendo variar determinados parâmetros nomeadamente, carga térmica dos espaços a climatizar, resistência térmica dos furos e condutividade térmica do solo, considerando valores obtidos através do TRT e outros consideradas, por defeito, pelo próprio programa.

Um dos objetivos deste estudo foi comparar a geometria e outros parâmetros do sistema geotérmico antes e após realização do TRT, uma vez que esta instalação já existia. Na altura da realização dos furos para o dimensionamento dos furos geotérmicos estimou-se, para o tipo de solo em questão, 2,6 W/(m.K) de condutividade térmica o que deu uma

otimização de furos 3 x 2 (5 furos), com uma profundidade de 80m, segundo o EED. Após o TRT foi possível confirmar que a condutividade térmica anteriormente estimada é semelhante à calculada – 2,465 W/(m.K), com uma diferença de 4%, e portanto confirma-se de que foi bem estimado.

Após a realização da nova simulação pelo EED, efetuando o cálculo de otimização da estrutura dos furos para os cinco furos, verificou-se que a configuração resultante se aproxima da configuração já existente. Concluiu-se que, aquando da instalação dos furos se tivesse sido realizado o TRT, a fim de procurar obter a opção mais económica, poder-se-ia ter poupado 16 m, com a mesma geometria retangular (3 x 2), com uma distância igualmente de 5m entre cada um, e a uma profundidade de 77 metros, conforme se verifica, pelo que se teria poupando cerca de 650 €. No entanto, confirma-se que a instalação não se encontra muito diferente da obtida pela nova simulação e, portanto, pode considerar-se que a mesma foi bem estimada.

Para realização da simulação pelo EED, foi necessário realizar uma simulação energética pelo HAP, a fim de obter parâmetros das cargas térmicas – valores necessários introduzir aquando realização do estudo no EED. O HAP permitiu concluir que a potência estimada de arrefecimento excede um pouco a potência de arrefecimento instalada, pelo que pode significar que a instalação foi ligeiramente subdimensionada. Verificou-se, no entanto, que a potência de aquecimento instalada está de acordo com a prevista pela simulação.

Durante o estudo de TRT aos furos geotérmicos existentes na Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, foram efetuados cinco testes a quatro furos diferentes, nomeadamente a três permutadores Duplo U e um permutador Coaxial. Os testes tiveram duração entre 69 e 90 horas. Registaram-se os valores temperatura de ida, temperatura de retorno e caudal de água mantendo constante a potência térmica debitada pelas resistências elétricas. Os dados foram registados ao segundo.

Aplicou-se o método Teoria da Fonte Linear para obter o valor da condutividade térmica do solo e resistência térmica dos furos. O valor mais baixo da condutividade térmica na ESTSetúbal é de 2,303 W/(m.K) correspondente ao segundo Duplo U e o Coaxial que apresenta um valor de 2,524 W/(m.K). Relativamente à resistência térmica dos furos, os valores estão compreendidos entre 0,074 (m.K)/W e 0,125 (m.K)/W, mostrando que o Coaxial tem um menor desempenho da eficiência que o Duplo U.

Para confirmar os resultados do modelo utilizado, foram comparadas as medições experimentais da temperatura da água com os valores calculados pelo próprio modelo. Os resultados do modelo matemático foram concordantes com as temperaturas medidas experimentalmente.

Verificou-se que os resultados obtidos de condutividade térmica e resistência térmica desenvolvidos na ESTSetúbal estão em conformidade com os valores relativos à constituição dos solos semelhantes. Após efetuado todo o estudo aos resultados obtidos através do TRT, como referido anteriormente verifica-se que o permutador de calor com maior eficiência energética é o permutador do tipo Duplo U, uma vez que este apresenta ter menor resistência térmica.

Posteriormente, utilizou-se o TRT para efetuar ensaios na Quinta da Ombria. Estes permitiram uma identificação dos parâmetros mais relevantes para uma conceção adequada do sistema geotérmico. Apesar de algumas limitações, nomeadamente do curto período de ensaio do TRT 2, teste nº2 e de algumas variações da tensão elétrica do gerador foi possível calcular esses valores com um grau de confiança adequado. O solo apresenta um valor médio da condutividade térmica para os três furos testados de $2,45 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, variando entre 1,91 e 3,10 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. A resistência térmica dos furos varia entre 0,076 e 0,188 $[(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}]$ e o calor injetado por unidade de comprimento de furo varia entre 56,6 e 80,7 W/m .

Este estudo permitiu, por um lado adquirir conhecimentos mais profundos na área de energia geotérmica associada à climatização de edifícios, e permitiu colaborar num desenvolvimento de um equipamento para teste de resposta térmica desde o desenvolvimento do protótipo e respetiva calibração em laboratório até à sua instalação e utilização real.

Capítulo 7

Desenvolvimento de Trabalhos Futuros

Usufruindo da experiência adquirida ao longo do trabalho realizado e apresentado no presente documento, os desenvolvimentos futuros enunciados têm como intuito melhorar o conhecimento em simulação e tudo o que abranja a utilização eficiente da energia geotérmica; e realizar estudos em áreas relacionadas.

- Uma das coisas a fazer quanto aos testes de resposta térmica seria continuar a desenvolver e explorar este equipamento em novas instalações, permitindo aumentar o conhecimento da utilização deste tipo de equipamentos;
- Outra proposta de desenvolvimento no futuro, passa por realizar novas simulações para instalações de bombas de calor geotérmicas, para diferentes tipos de edifícios e diferentes tipos de constituição de solo;
- Relativamente à simulação numérica, no futuro seria relevante a possibilidade de utilizar ferramentas mais sofisticadas de simulação numérica para a troca de calor no interior do solo, nomeadamente programas de Cálculo de Mecânica de Fluidos Computacional (CFD).

Referências

- [1] Diretiva 2009/28/CE, Parlamento Europeu do Conselho, (2009).
- [2] Diretiva 2010/31/EU, Parlamento Europeu, (2010).
- [3] *Renewable Energy in Europe*. (2010). UK, USA, Earthscan. 2.^a Edição, cap. I, p. 62-87, ISBN:978-1-84407- 875-2.
- [4] Gehlin, S. (2002). Thermal Response Test - Method Development and Evaluation. *SwePub*.
- [5] Austin W. A. III. (1998). Development of an in situ system for measuring ground thermal. *Okhahoma State University*.
- [6] Edifícios e Energia. *Geotermia do interior da terra para os nossos edifícios*, [Online]. Disponível em: <http://www.edificioseenergia.pt>. [consultado em 02-09-2015].
- [7] Coelho, L., Garcia, J., Almeida, A., Tavares, N., Cerdeira, R., Karytsas, K., Mendrinos, E., Sanner, B., e Auzenet, E. (2013). Ground Source Heat Pump on Building Acclimatization in Coimbra, Portugal. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*.
- [8] Moretti, E., Bonamente, E., Buratti, E., Cotana, F. (2013). Development of Innovative Heating and Cooling Systems Using Renewable Energy Sources for Non-Residential Buldings. *MDPI*.
- [9] Emir, Civa, Latek, Proses. (2013). Need4B – New Energy Efficient Demonstration for buldings. *Need4b*.
- [10] Mands, E., Sauer, M., Grundmann, E., Sanner, B. (2013). Optimization of industrial size cold production from a ground source heat pump plant using

borehole heat exchangers. *Sanner-Geo*.

- [11] Adam, B. (2012). Thermal conditions of geothermal heat exchangers in case of heat pump systems. *Universidade Szent Istvan*.
- [12] Hemmingway, P., Long, M. (2012). Thermal response testing of compromised borehole heat exchangers. *Universidade Press Oxford*.
- [13] Lavado, A. L. C. (2009). Os Actuais Desafios da Energia – Implementação e Utilização das Energias Renováveis. *Ebah*.
- [14] Instalaciones J Carpio. *Geotérmica*, [Online]. Disponível em <http://www.instalacionescarpio.com>. [consultado em 15-05-2015].
- [15] Qzero Energy Bulding. *Bombas de calor*, [Online]. Disponível em: <http://www.qzero.pt>. [Consultado em 02-05-2015].
- [16] Lamarche, L., Beauchamp, B. (2006). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *ScienceDirect*.
- [17] Energy Systems & Sustainable Living. *Geothermal*, [Online]. Disponível em: <http://ecoandsustainable.com>. [consultado em 30-10-2015].
- [18] DGEG. (2015). *Energia Geotérmica*, [Online]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt>. [consultado em 18-10-2015].
- [19] Coelho, L., Garcia, J., Cerdeira, R., Tavares, N. (2013). Introdução às Bombas de Calor Geotérmicas. *Institute of Systems and Robotics – Universidade de Coimbra*.
- [20] Urcaplas, Indústria de Plásticos, Lda. *Polietileno de Alta Densidade*, [Online]. Disponível em: <http://www.urcaplas.com>. [consultado em 10-09-2015].

- [21] Cafn. (2015). *Tubagens de cobre revestidas a PVC*, [Online]. Disponível em: <http://www.cafn.pt>. [consultado em 20-10-2015].
- [22] GudEnergy- Energias Renováveis, Lda. *Geotermia*, [Online]. Disponível em: <http://www.gudenergy.pt>. [consultado em 02-10-2015].
- [23] Mendes, J. C. et al. (1989). *Temperaturas Exteriores de Projeto e Números de Graus-Dias*. Lisboa, INMG/LNEC.
- [24] Despacho 15793_E/2013. (2013). Diário de República, 2ª. Série – Nº 234.
- [25] Santos, C. A. P. e Matias, L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa, LNEC - série: ITE 50.
- [26] Santos, C. A. P. e Rodrigues, R. (2010). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – Soluções construtivas de edifícios antigos; Soluções construtivas das Regiões Autónomas*. Lisboa, LNEC - série: ITE 54, 4ª. Versão.
- [27] Despacho 15793_K/2013. (2013). Diário de República, 2ª. Série – Nº 234.
- [28] EED 3.0 Earth Energy Designer. (2008). Software within building physics and ground heat storage, documentation.
- [29] Buildingphysics. (2008). *EED*, [Online]. Disponível em: <http://www.buildingphysics.com>. [consultado em 12-10-2015].
- [30] Madureira, P., Pinto, V., Martinez, S., Rodrigues, J. (2012). *Thermal Response Test*. Loulé, GeoPlano.
- [31] IEA. (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris, OECD/IEA. ISBN: 978-92-64-08624-1.

- [32] IGSHA. (2015. *Geothermal*, [Online]. Disponível em: <http://www.igsha.okstate.edu>. [consultado em 15-09-2015].
- [33] Zervantonakis, I., Reuss, M. (2004). Quality Requirements of a Thermal Response Test. *Universidade Stockton*.
- [34] Bandos, T. V., Montero, A., Fernandez, E., Santander, J. L. G., Isidro, J. M., Perez, J., Cordoba, P. J. F., Urchueguia, J. F. (2009). Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *ScienceDirect*.
- [35] Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., e Gehlin, S. (2005). Thermal Response Test – Current Status and World-Wide. *World Geothermal Congress 2005*.
- [36] Javed, S., Claesson, J., Beier, R. (2011). Recovery times after thermal response testes on vertical borehole heat exchangers. *Chalmers. Proceedings of 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR2011)*.
- [37] Luo J., Rohn J., Bayer M. e Priess A. (2013). Thermal Efficiency Comparison of Borehole Heat Exchangers with Different Drillhole Diameters. MDPI. ISSN 1996-1073.
- [38] Holman, J. (1983). Princípio da Convecção. In Holman, J. *Transferência de Calor*. São Paulo, McGraw-Hill. Cap. 5, p.184-247.

Anexos

Anexo I

Preparação do Artigo Científico

Teste de Resposta Térmica

Comparação do desempenho energético entre permutadores de calor Duplo U e Coaxial

RESUMO

O desempenho térmico de um sistema de bomba de calor geotérmica é comumente estimada através da simulação numérica do permutador de calor, devendo ser confirmado após a execução do primeiro furo efetuado por um Teste de Resposta Térmica (TRT). Existem dois parâmetros importantes que afetam diretamente o desempenho térmico.

Deste modo, este estudo teve dois objetivos principais:

- Determinar a condutividade térmica do solo em estudo;
 - Comparar a resistência térmica de dois tipos de permutadores de calor Duplo U e Coaxial, já existentes no local em estudo.
- Para o efeito, em parceria com a entidade *GeoPlano*, recorreu-se ao método TRT para obtenção de resultados que serão apresentados ao longo do documento.

Palavras-Chave: Teste de Resposta Térmica, Permutador de calor, Duplo U, Coaxial, Geotermia.

Símbolos

c_p	Calor específico	J/(kg.K)
\dot{m}	Caudal	kg/s
T_1	Temperatura de entrada no permutador	°C
T_2	Temperatura de saída do permutador	°C
T_f	Temperatura média do fluido	°C
T_0	Temperatura solo	°C
F	Medidor de Caudal	
k	Inclinação tempo vs logaritmo tempo	
λ	Condutividade térmica	W/(m.K)
γ	Constante de Euler	-
\dot{Q}	Potência	W
ρ	Massa específica do solo	kg/m ³
t	Tempo	s
α	Difusividade Térmica do solo	m/s ²
r_b	raio do furo	m
R_b	Resistência Térmica	(m.K)/W

1. INTRODUÇÃO

O TRT é um método de avaliar as características chave do comportamento térmico do terreno e consecutivamente uma forma de obter uma estimativa dos rendimentos de transferência térmica tendo em conta as principais características a determinar, nomeadamente a condutividade térmica, a resistência térmica no interior do furo e as condições térmicas do terreno. O TRT, é utilizado a fim de ser possível dimensionar com segurança um sistema de climatização geotérmica. O método TRT foi executado e testado no Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, usufruindo dos cinco furos no solo já existentes a uma profundidade de 80m na vertical, com um diâmetro de 140 mm cada.

A descrição dos testes de resposta térmica e respetivos resultados obtidos é apresentada posteriormente. ^[1]

2. TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA

2.1 Instalação

A representação esquemática do TRT encontra-se na esquematizada na Figura 1. Esta consiste nas seguintes partes: 1. Sensor de Temperatura de entrada (T_2); 2. Medidor de Caudal; 3. Válvula de regulação; 4. Vaso de Expansão; 5. Válvula de Enchimento; 6. Resistências elétricas; 7. Sensor de Temperatura; 8. Válvula de Segurança; 9. Bomba de circulação; 10. Purgador; 11. Manómetro; 12. Sensor de temperatura (T_3). ^[2]

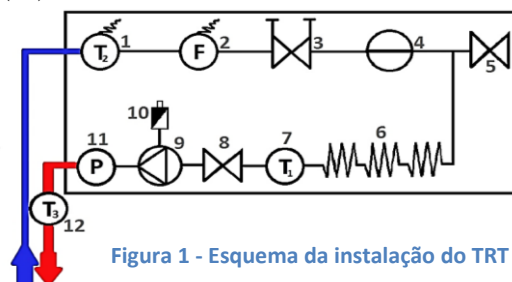


Figura 1 - Esquema da instalação do TRT

2.2 Fase Experimental

É recomendado que o TRT tenha uma duração de, pelo menos, 36-50 horas consecutivas. Esta recomendação é dada, tendo em conta que o TRT é um processo transiente, relativamente lento e dependente de vários parâmetros geotérmicos.

Os parâmetros recolhidos são as temperaturas de entrada no permutador (T_1) e saída (T_2) e medidor de caudal (F) e Potência elétrica das resistências – Figura 1.

Para o efeito, são utilizados os valores constantes, nomeadamente: 80m de profundidade do furo; 140mm de diâmetro; 1000 J/(kg.K) de Capacidade específica do solo (c_p solo); 4,187 J/(kg.K) de Capacidade específica da água (c_p água); 0,576 relativo à Constante de Euler (γ); 2600 kg/m³ de Massa específica do solo (ρ); 19-20°C Temperatura do solo não perturbada. [3][4][5]

Foram testados dois tipos de permutador de calor verticais enterrados, nomeadamente três Duplo U, tubo do tipo PE-HD com 32mm de diâmetro; e dois Coaxiais, tubo do tipo PE-HD com 32mm de espessura do tubo interior e 60mm de espessura do tubo exterior.

2.3 Tratamento de dados

Nos sistemas geotérmicos, modelagem de fenómenos de transferência de energia entre o permutador de calor e o subsolo é de extrema importância, uma vez que permite otimizar o projeto do sistema e obter uma alta eficiência no consumo de energia.

É de salientar que no cálculo foram retirados os dados de medição do TRT correspondentes aproximadamente a 7,5 horas iniciais de funcionamento consecutivo após arranque da bomba de circulação, a fim de estabilizar a taxa de calor trocada pelo solo, com a finalidade de verificar coerência dos valores obtidos.

Os resultados obtidos através dos testes de resposta térmica, nomeadamente T_1 ; T_2 e F , são analisados e tratados a fim de obter parâmetros relevantes para o estudo em questão – Tabela 1, tendo em conta valores apresentados anteriormente no ponto 2.2, nomeadamente:

- Temperatura média do Fluido, determinada através da média Aritmética das temperaturas de entrada e saída, T_1 e T_2 , respetivamente, obtida através da Teoria de fontes lineares (*linear source theory*): [6]

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} [\ln t] + \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q} \times R_b}{H} + T_0 \quad [\text{Eq. 1}]$$

- Potência, quantidade de energia sob a forma de calor concedida por uma fonte a cada unidade de tempo:

$$\dot{Q} = c_{p \text{ água}} \times \dot{m} \times (T_2 - T_1) \quad [\text{Eq. 2}]$$

- Condutividade Térmica da formação geológica, ou velocidade da condução da energia térmica no interior do material em que o furo do permutador de calor está instalado, expressa da seguinte forma: [7]

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi \times k \times H} \quad [\text{Eq. 3}]$$

- Difusividade Térmica do solo, indica como o calor se difunde através de um material: [6]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times c_p} \quad [\text{Eq. 4}]$$

- Resistência Térmica do furo, causada principalmente pela transferência térmica, isto é, pelo contacto entre o material utilizado para preencher o furo e o próprio furo. [8]

$$R_b = \frac{H}{\dot{Q}} \times \left[T_f(t) - \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \ln(t) - T_0 \right] - \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \right) \times \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad [\text{Eq. 5}]$$

2.4 Resultados Obtidos

Em todos os casos, antes de realizar os TRT, foram realizadas medições da temperatura do solo não perturbada. Isto é, foi efetuado a verificação do valor da temperatura do solo através da monitorização das temperaturas fluido que sai do permutador de calor no arranque da bomba de circulação, altura em que o fluido mantém o equilíbrio térmico com o solo circundante. Desta forma, a temperatura do fluido que sai do permutador de calor fornece uma estimativa precisa da temperatura do solo imperturbado.

Para os testes relatados em cima, as medições de temperatura do solo não perturbadas estiveram compreendidas entre 19,5 e 20,2 °C.

O passo seguinte foi a avaliar os testes de resposta térmica para obter uma estimativa da condutividade térmica do solo. Ao simular desenvolvimento de temperaturas do solo depois de um teste de resposta térmica, uma estimativa da condutividade do solo é requerida pelo modelo matemático apresentado anteriormente. O solo apresenta

um valor médio para todos os testes relativamente elevado da condutividade térmica de 2,5 W / (m · K).

A temperatura média do fluido para os diferentes testes, o valor da temperatura do fluido à entrada do furo situa-se entre 36,2 °C e 42,0 °C, e à saída do furo entre 32,9°C e 37,8 °C. Quanto à potência térmica, esta variou nos diferentes testes entre 4,2 kW e 6,7kW. Relativamente ao caudal de água, esta variou entre os 0,3 kg/s e 0,4 kg/s.

Os principais resultados obtidos encontram-se apresentados, de forma sucinta, na Tabela 1.

Deste modo, obteve-se as curvas das temperaturas do fluido, à entrada do permutador (T_1), ao longo do tempo, a fim de gerar a equação da reta linear relativamente à evolução logarítmica do tempo, que fornece os valores do parâmetro de inclinação tempo vs logaritmo tempo (k), respetivo a cada permutador de calor – Figura 2, Tabela1.

Tabela 1 - Comparação entre os principais resultados obtidos quer Duplo U, quer Coaxial.

Parâmetro		Sigla	Duplo U				Coaxial
			N.º 1	N.º 2		N.º 3	N.º 1
			1º Teste	1º Teste	2º Teste	1º Teste	1º Teste
Potência [W]		Q	6677,449	4446,866	6402,118	6337,960	4193,043
Caudal [l/s]		q	0,346	0,354	0,360	0,350	0,300
Inclinação tempo vs logaritmo tempo ¹		k	2,516	1,865	2,766	2,156	1,652
Condutibilidade Térmica [W/(m.K)]		λ	2,640	2,372	2,303	2,924	2,524
Temperatura Solo [°C]		T_0	19,770	19,770	19,550	19,770	20,21
Difusividade térmica solo [m/s ²]		α	10E-07	9,1E-07	8,86E-07	10,1E-07	9,7E-07
T_{in} [°C]		T_2	40,210	34,210	41,980	39,980	36,210
T_{out} [°C]		T_1	35,540	31,990	37,760	35,320	32,870
Resistência Térmica [(m.K)/W]		R_b	0,074	0,076	0,094	0,093	0,125
Período funcionamento		-	8/9/14 – 11/9/14	18/09/14- 22/09/14	28/10/14- 31/10/14	26/9/14- 30/9/14	12/9/14- 16/9/14
Tempo funcionamento [horas]	Horas ²	-	6,452	7,332	7,588	6,716	7,157
	Tempo total teste ³	-	69	89	70	90	90

1 Valor gerado através da equação linear da reta, após obter as curvas de crescimento da temperatura do fluido ao longo do tempo.

2 Após arranque da bomba de circulação e posterior estabilização do sistema.

3 Tempo total da execução do teste, em horas.

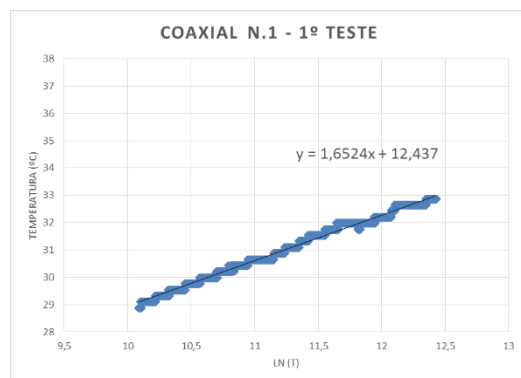
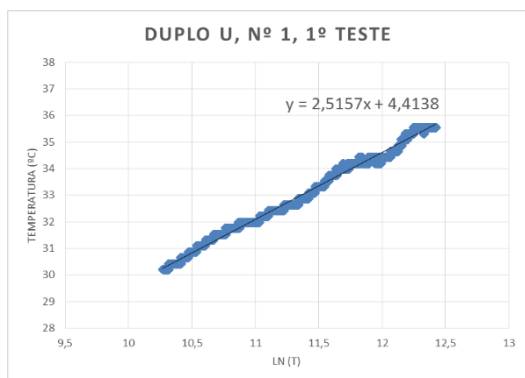
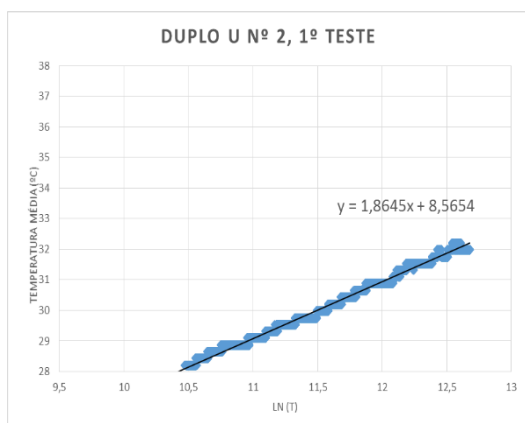
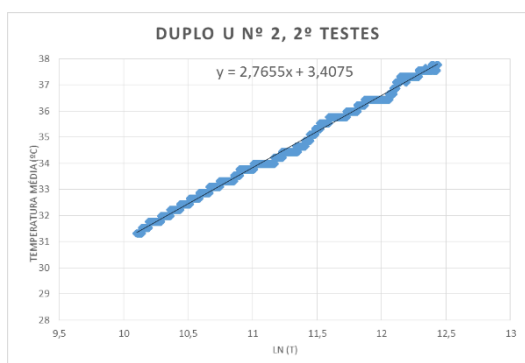


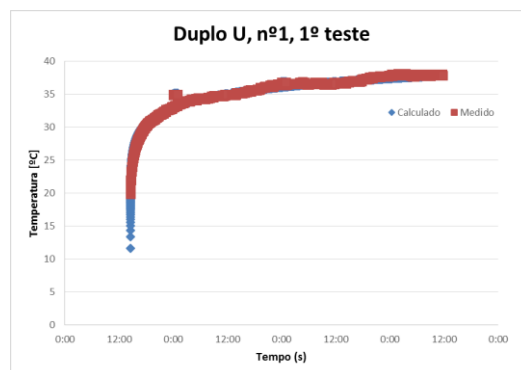
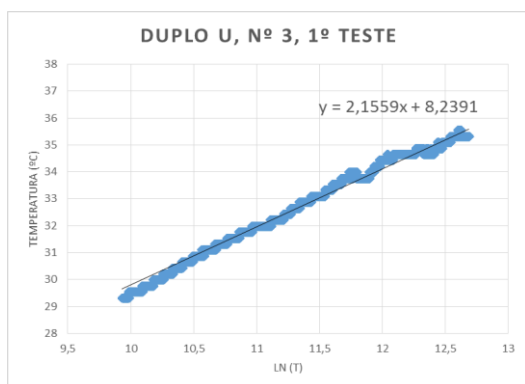
Figura 1 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo e valor da inclinação tempo vs logaritmo tempo, obtido através da equação da reta.



Com o valor de inclinação tempo vs logaritmo tempo que corresponde à inclinação da reta, introduzindo na Eq. 3 obtém-se o valor da condutividade térmica do solo (λ) para cada ensaio.



Posteriormente, foi possível estudar a coerência entre os valores da temperatura do fluido calculada através da média aritmética – Eq.1, e a média das temperaturas T_1 e T_2 medidas – Figura 3.



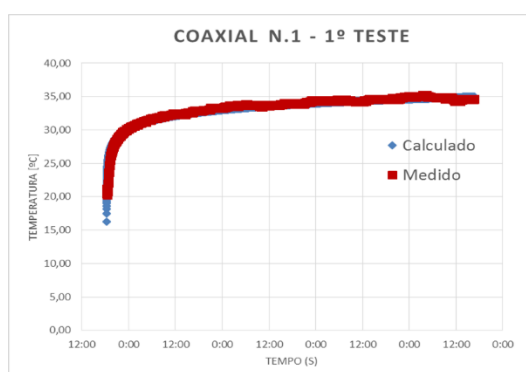
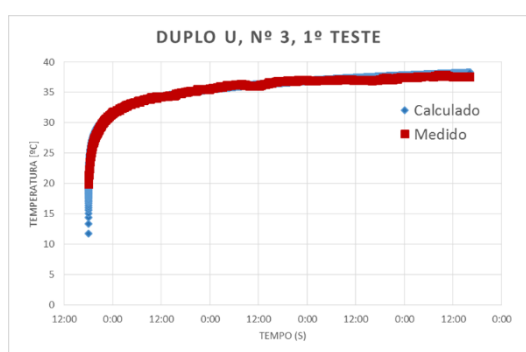
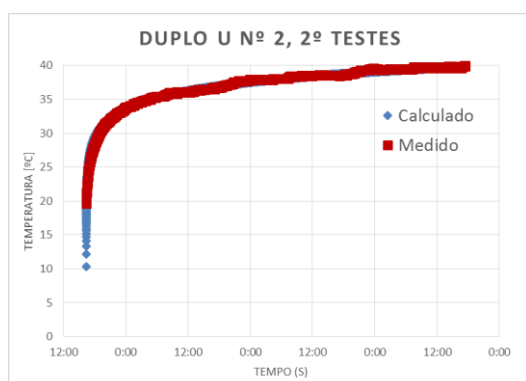
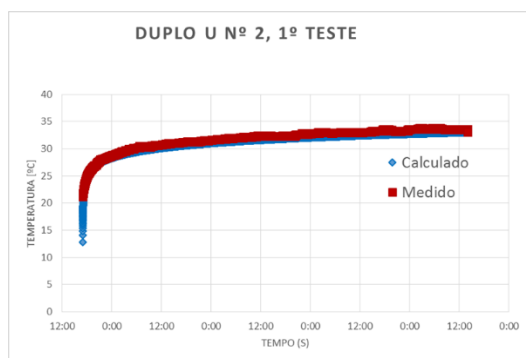


Figura 1 - Comparação entre as Tfluido, obtidas através do cálculo da média aritmética – Eq.1, e a média simplificada das temperaturas T_1 e T_2 .

Verifica-se uma ótima concordância entre os valores de temperatura medidos e calculados.

Na Tabela 1, apresentam-se também os valores das resistências térmicas dos furos, calculados de acordo com a Eq.5. Os valores variaram entre 0,074 (m.K)/W e 0,094 (m.K)/W para os permutadores do tipo Duplo U. O permutador coaxial apresenta um valor ligeiramente superior 0,125 (m.K)/W, de acordo com o que era esperado. Conclui-se que o Duplo U apresenta um melhor desempenho energético que o permutador Coaxial.

1. CONCLUSÕES

Desenvolvido o equipamento para TRT aos furos geotérmicos existentes na Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, onde foram efetuados cinco testes a quatro furos diferentes, nomeadamente a três permutadores Duplo U e um permutador Coaxial. Os testes tiveram duração entre 69 e 90 horas.

Registaram-se os valores temperatura de ida, temperatura de retorno e caudal de água mantendo constante a potência térmica debitada pelas resistências elétricas. Os dados foram registados ao segudo.

Aplicou-se o método Teoria da Fonte Linear para obter o valor da condutividade térmica do solo e resistência térmica dos furos. O valor mais baixo da condutividade térmica é de 2,303 W/(m.K) correspondente ao segundo Duplo U e o Coaxial que apresenta um valor de 2,524 W/(m.K).

Relativamente à resistência térmica dos furos, os valores estão compreendidos entre 0,074 (m.K)/W e 0,125 (m.K)/W, mostrando que o Coaxial tem um menor desempenho da eficiência que o Duplo U, uma vez que apresenta uma maior resistência térmica.

Anexo II

Relatório Técnico Geoplan (Sygene)



**ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DE FUROS
GEOTÉRMICOS E TESTES DE RESPOSTA TÉRMICA**



ALDEIA DA TÔR, LOULÉ

Agosto de 2015

Anexo III

Planta ESTSetúbal – Área abrangida pela Geotermia

Anexo IV

Despacho 15793_E/2013: Valores do coeficiente de transmissão térmico por elementos em contacto com o solo

Tabela 02 - Valores do coeficiente de transmissão térmica por elementos em contacto com o solo

z [m]	Pavimento enterrado U_{bf} [W/(m ² .°C)]		Parede enterrada U_{bw} [W/(m ² .°C)]	
	$R_f < 0,75$	$R_f \geq 0,75$	$R_w < 0,75$	$R_w \geq 0,75$
<1	1,0	0,6	2,0	0,8
$1 \leq z < 3$	0,8	0,6	1,5	0,7
≥ 3	0,6	0,4	0,8	0,5

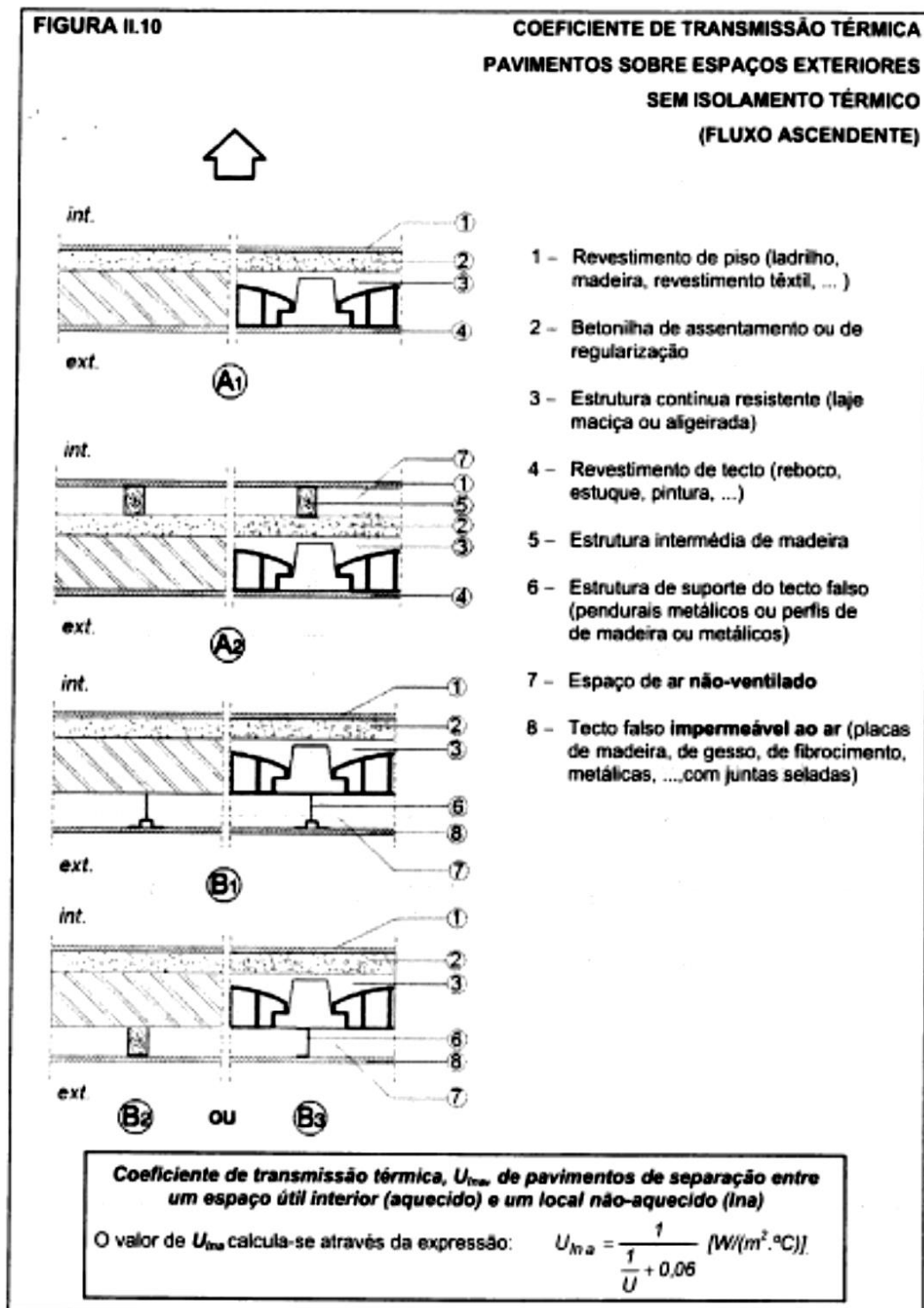
em que:

R_f e R_w - Resistências térmicas do pavimento e da parede em contacto com o solo, com exclusão das resistências térmicas superficiais interior R_{si} e exterior R_{se} [m².°C/W]

z - Valor médio da profundidade enterrada ao longo do perímetro exposto, [m]

Anexo V

Cobertura Pesada Horizontal – ITE 50



Anexo VI

ITE 50: Coeficiente global de transmissão térmica, pavimento sobre espaços exteriores, sem isolamento térmico (fluxo ascendente)

A – Pavimento sem tecto falso

Aplicação do revestimento de piso	Estrutura resistente							
	Laje maciça	Laje aligeirada						
		blocos cerâmicos		blocos de betão normal		blocos de betão leve		
	Espessura da laje							
	[m]							
	0,10 0,20	0,13 0,15	0,33 0,35	0,13 0,15	0,33 0,35	0,13 0,15	0,33 0,35	
A1 – Directamente sobre a betonilha	3,1	2,6	1,6	2,7	2,0	2,5	1,8	
A2 – Sobre uma estrutura de suporte de madeira	2,0	1,8	1,3	1,8	1,5	1,8	1,4	

Anexo VII

Resistências Superficiais - Despacho 159_K, Tabela 1.

Tabela 01 - Valores das resistências térmicas superficiais, R_{se} e R_{si}

Sentido do fluxo de calor		Resistência térmica [m ² .°C/W]	
		Exterior R_{se}	Interior R_{si}
Horizontal		0,04	0,13
Vertical	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

Anexo VIII

Despacho 15793_E – ponto 1.2

1.2. Coeficiente de redução de perdas

1 - Na determinação dos valores dos coeficientes de redução de perdas, b_{tr} para o cálculo da transferência de calor por transmissão através da envolvente interior, por elementos em contacto com locais não-úteis e edifícios vizinhos, admite-se que se possam tomar os seguintes valores por defeito:

- 0,8 para todos os espaços não úteis;

- 0,6 para edifícios adjacentes.

Anexo IX

ITE 50: Coeficiente global de transmissão térmica, Vãos envidraçados

QUADRO III.2

COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA
VAOS ENVIDRAÇADOS VERTICAIS
CAIXILHARIA METÁLICA
 U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]

A – SEM CORTE TÉRMICO

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	$U_w^{(1)}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]	$U_{win}^{(2)}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]		
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Cortina interior opaca	Outros dispositivos	
						Com permeabilidade ao ar elevada	Com permeabilidade ao ar baixa
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa	—	6,0	4,9	4,5	3,8
		giratória	—	6,2	5,0	4,6	3,9
		de correr	—	6,5	5,2	4,8	4,1
	2 (vidro duplo)	fixa	6	3,9	3,4	3,2	2,8
			16	3,5	3,1	2,9	2,6
			16 low e ⁽³⁾	3,1	2,8	2,6	2,3
		giratória	6	4,3	3,7	3,4	3,0
			16	3,8	3,3	3,1	2,7
			16 low e ⁽³⁾	3,6	3,2	3,0	2,6
		de correr	6	4,5	3,9	3,6	3,1
			16	4,0	3,5	3,3	2,9
			16 low e ⁽³⁾	3,7	3,3	3,1	2,7
Duplo ⁽⁴⁾ (2 janelas)	1 (vidro simples) em cada janela	fixa, giratória ou de correr	50 a 100 mm (distância entre janelas)	3,1	2,8	2,6	2,3

Anexo X

Despacho 15793_K/2013: Fator solar do vidro

Tabela 12 - Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão, $g_{L,vi}$

Composição do vidro		$g_{L,vi}$
Vidro Simples	Incolor 4mm	0,88
	Incolor 5mm	0,87
	Incolor 6mm	0,85
	Incolor 8mm	0,82
	Colorido na massa 4mm	0,70
	Colorido na massa 5mm	0,65
	Colorido na massa 6mm	0,60
	Colorido na massa 8mm	0,50
	Refletante Incolor 4 a 8mm	0,60
	Refletante colorido na massa 4 a 5mm	0,50
	Refletante colorido na massa 6 a 8mm	0,45
	Fosco	(1)
Vidro Duplo (ext + int)	Incolor 4 a 8mm + Incolor 4 mm	0,78
	Incolor 4 a 8mm + Incolor 5 mm	0,75
	Colorido na massa 4mm + Incolor 4 a 8 mm	0,60
	Colorido na massa 5mm + Incolor 4 a 8 mm	0,55
	Colorido na massa 6mm + Incolor 4 a 8 mm	0,50
	Colorido na massa 8mm Incolor 4 a 8 mm	0,45
	Refletante Incolor 4 a 8mm + Incolor 4 a 8 mm	0,52
	Refletante colorido na massa 4 a 5mm + Incolor 4 a 8 mm	0,40
	Refletante colorido na massa 6 a 8mm + Incolor 4 a 8 mm	0,35
	Tijolo de Vidro	0,57
	Fosco	(1)

Anexo XI

Despacho 15793_K/2013: Fator solar envidraçado com proteção solar 100% ativa

Tipo de Proteção		g_{Tvc}					
		Vidro Simples			Vidros Duplos		
		Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Proteções exteriores	Persiana de réguas metálicas ou plásticas	0,07	0,10	0,13	0,04	0,07	0,09
	Estore veneziano de lâminas de madeira	-	0,11	-	-	0,08	-
	Estore veneziano de lâminas metálicas	-	0,14	-	-	0,09	-
	Lona opaca	0,07	0,09	0,12	0,04	0,06	0,08
	Lona pouco transparente	0,14	0,17	0,19	0,10	0,12	0,14
	Lona muito transparente	0,21	0,23	0,25	0,16	0,18	0,2
Proteções interiores	Estores de lâminas	0,45	0,56	0,65	0,47	0,59	0,69
	Cortinas opacas	0,33	0,44	0,54	0,37	0,46	0,55
	Cortinas ligeiramente transparentes	0,36	0,46	0,56	0,38	0,47	0,56
	Cortinas transparentes	0,38	0,48	0,58	0,39	0,48	0,58
	Cortinas muito transparentes	0,70	-	-	0,63	-	-
	Portadas opacas	0,30	0,40	0,50	0,35	0,46	0,58
	Persianas	0,35	0,45	0,57	0,40	0,55	0,65
	Proteção entre dois vidros: estore veneziano, lâminas delgadas	-	-	-	0,28	0,34	0,40

Anexo XII

Mapa furos geotérmicos Quinta da Ombria, Algarve



Legenda
FG - Localização aproximada da perfuração para furo geotérmico e teste de resposta térmica

Localidade	Quinta da Ombra
Projeto	Quinta da Ombra
Objetivo	acompanhamento de perfurações para furos geotérmicos e testes de resposta térmica
Local	Quinta da Ombra
Planta	Planta com localização aproximada das perfurações realizadas
Escala	1:3000 (A3) 1:4000 (A4)
Autores	Pedro Martins
Data	09-06-2018
Revista	025.15.PRI_01